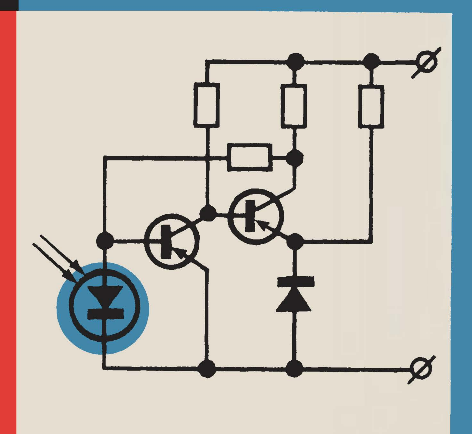




Л. К. БУЗАНОВА, А. Я. ГЛИБЕРМАН

Полупроводниковые фотоприемники

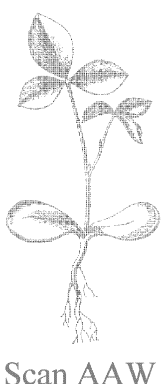


МАССОВАЯ
РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 902

Л. К. БУЗАНОВА, А. Я. ГЛИБЕРМАН

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ







«ЭНЕРГИЯ» МОСКВА 1976

6Ф0.34
Б 90
УДК 621.382.2

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А. И., Белкин Б. Г., Борисов В. Г., Бурлянд В. А., Ванеев В. И., Геништа Е. Н., Гороховский А. В., Демьянов И. А., Ельяшкевич С. А., Жеребцов И. П., Корольков В Г., Смирнов А. Д., Тарасов Ф. И, Чистяков Н. И., Шамшур В. И.

Бузанова Л. К. и Глиберман А. Я.

Б 90 Полупроводниковые фотоприемники. М., «Энергия», 1976.

64 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 902).

В книге описаны физические основы работы фотоприемников с одним *p-n* переходом, даны их основные характеристики и параметры. Рассмотрены отдельные разновидности фотоприемников — фотодиоды, фотоварикапы, а также специальные фотопреобразователи, используемые в качестве источников питания.

Приведены примеры использования фотоприемников в различных электронных устройствах.

Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

Б $\frac{30404\text{-}006}{051(01)\text{-}76}$ 358-75 6Ф0.34

© Издательство «Энергия», 1976 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы в радиоэлектронике, автоматике и телемеханике, вычислительной технике и других областях народного хозяйства все более широкое применение находят полупроводниковые фотоприемники излучения на основе *p-n* перехода. Одним из направлений в области фотоэлектричества является разработка, исследование и применение полупроводниковых фотоприемников с одним *p-n* переходом, описанию которых посвящена данная книга.

Интерес к фотоприемникам особенно усилился в связи с появлением различного типа источников когерентного и некогерентного излучения. Создание инжекционных полупроводниковых светодиодов и новых типов полупроводниковых фотоприемников на основе одного или нескольких p-n переходов в миниатюрном и микроминиатюрном исполнениях способствовало бурному развитию такой новой области электронной техники, как оптоэлектроника, в которой сочетаются два способа передачи и обработки информации — оптический и электрический.

В настоящее время существует значительный объем научно-технической литературы, посвященной физике работы фотоприемников с одним *p-n* переходом и описанию их характеристик [1—9], а также методам проектирования схем с использованием фотоприемников [10—18]. Большой вклад в разработку перечисленных проблем внесен советскими учеными.

Вместе с тем в научно-популярной литературе перечисленные вопросы не нашли должного отражения.

В данной книге в достаточно популярной форме изложены вопросы физики работы и применения фотоприемников с одним *p-n* переходом. Использованы имеющиеся достижения в этой области в СССР и за рубежом. Приведены основные характеристики и параметры фотоприемников, рассмотрены специфические особенности их работы в ряде конкретных устройств. Описаны также некоторые типы фотоприемников — малоинерционные, лавинные, фотоварикапы, фотовольты и т. д., при этом основное внимание уделено кремниевым приборам. Приведены примеры электронных устройств различного назначения с фотоприемниками.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СВЕТОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Прежде чем рассматривать процесс преобразования световой энергии в электрическую с помощью структуры с *p-n* переходом, целесообразно остановиться на основных моментах взаимодействия излучения с полупроводником. Излучение, падающее на полупроводник, можно разделить на три части. Одна часть излучения отражается от поверхности полупроводника, другая поглощается в объеме, а третья — проходит через полупроводник.

В полупроводниковых фотоэлектрических приборах, преобразующих энергию излучения в электрическую, желательно, чтобы в объеме полупроводника поглощалась большая часть падающего излучения, так как излучение, отраженное от поверхности и проникающее сквозь полупроводник, расходуется бесполезно. Одним из видов взаимодействия излучения с полупроводником, лежащим в основе принципа действия большинства фотоэлектрических приборов, является генерация носителей тока под действием фотонов. При этом образуется пара электрон — дырка, если фотон взаимодействует с атомом кристаллической решетки полупроводника (собственное поглощение), или только электрон или дырка, если фотон взаимодействует с атомами донорных или акцепторных примесей (примесное поглощение).

Эти процессы поглощения называются внутренним фотоэффектом. Поток фотонов, проникающих в полупроводник, уменьшается по мере проникновения в объем полупроводника по закону

$$F(x) = F_0 \exp(-\alpha x), \qquad (1)$$

где F_0 — поток фотонов, проникающих через поверхность полупроводника (фотон/см$^2\cdot$с); $F(x)$ — поток фотонов на глубине x от поверхности; α — коэффициент поглощения.

Величина, обратная коэффициенту поглощения $1/\alpha$, определяет глубину, на которой поток фотонов, проникающих через поверхность, уменьшается в e раз и обычно считается глубиной проникновения в полупроводник излучения с коэффициентом поглощения α. Коэффициент α зависит от механизма поглощения, ширины запрещенной зоны полупроводника ΔE, длины волны падающего излучения и является мерой скорости уменьшения плотности фотонов в процессе проникновения в полупроводник.

Для фотонов с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны, коэффициент поглощения в собственном полупроводнике равен нулю. Для фотонов с энергией, превышающей ΔE, коэффициент поглощения резко возрастает. В области коротких длин волн коэф-

фициент поглощения достигает достаточно большой величины, т. е. излучение в этой области спектра проникает на очень малую глубину. В длинноволновой области спектра коэффициент поглощения уменьшается на несколько порядков, а глубина проникновения увеличивается в несколько раз В табл. 1 приведена глубина проникновения излучения $1/\alpha$ в кремнии для различных λ в области собственного поглощения.

Таблица 1

λ, мкм	0,45	0,5	0,56	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
$1/\alpha$, мкм	0,40	0,89	1,61	2,12	3,03	4,33	6,14	8,9	14	24	63	208

Если на структуру с *p-n* переходом действует излучение в области длин волн, соответствующих собственному поглощению в полупроводнике, то под действием излучения в объеме полупроводника (в *p*- и *n*-области) генерируются электронно-дырочные пары. Если в *p*- и *n*-областях нет электрического поля, то генерируемые светом носители будут рассасываться в результате диффузии. В процессе своего движения электроны и дырки исчезают, соединяясь друг с другом, т. е. рекомбинируют, причем на расстоянии L, равном диффузионной длине неосновных носителей, их концентрация уменьшается в e раз. При этом $L=\sqrt{D\tau}$, где D — постоянная диффузии, τ — время жизни или время существования носителей до момента их рекомбинации.

Часть генерируемых носителей, которые доходят до *p-n* перехода, разделяется полем перехода; при этом неосновные носители проходят через область перехода, а основные носители остаются. В результате такого разделения в *n*-области кристалла будут накапливаться избыточные электроны, а в *p*-области — избыточные дырки. Скопление избыточных носителей приведет к тому, что *n*-область зарядится отрицательно, а *p*-область — положительно. Образующееся при этом дополнительное электрическое поле, противоположное существующему полю *p-n* перехода, снижает высоту потенциального барьера, как и в случае прямого смещения *p-n* перехода. Величина, на которую снижается высота потенциального барьера, представляет собой фото-э. д. с., которую генерирует *p-n* переход под действием излучения. Величина фото-э. д. с. зависит от интенсивности потока излучения, ширины запрещенной зоны и сопротивления нагрузочного резистора $R_н$, включенного во внешнюю цепь фотоприемника (ФП). Если цепь ФП разомкнута ($R_н=\infty$), то все избыточные, разделенные *p-n* переходом носители скапливаются у *p-n* перехода, снижают потенциальный барьер на максимально возможную величину, а следовательно, создают максимальное значение фото-э. д. с., равное напряжению холостого хода $U_{х\,х}$. Если ФП замкнут накоротко ($R_н=0$), то разделенные переходом носители будут циркулировать через эту короткозамкнутую цепь, создавая максимально возможное значение тока короткого замыкания $I_{к\,з}$. При этом у *p-n* перехода скопления избыточных зарядов не возникает. Потенциальный барьер будет иметь ту же высоту, что и в равновесном состоянии *p-n* перехода и $U_{х\,х}=0$. Если ФП замкнут на конечное сопротивление $R_н$, то часть разделенных носителей за-

тратит свою энергию на снижение потенциального барьера, т. е. на создание напряжения $U_н$, а оставшаяся часть избыточных носителей создаст ток $I_н$ через нагрузку.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В *p*- и *n*-ОБЛАСТЯХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Под действием излучения генерация электронно-дырочных пар происходит на различном расстоянии от поверхности в зависимости от того, на какой глубине поглощается излучение. Так, например, для кремния коротковолновое излучение поглощается в очень тонкой, прилегающей к поверхности области и для *n-p* структуры, как правило, в *n*-области ФП, т. е. до *p-n* перехода, *n-p* структура ФП состоит из тонкой *n*-области, на которую падает излучение, и более толстой *p*-области, разделенных областью объемного заряда (*p-n* переходом). Длинноволновое излучение проникает в кремний глубже и в зависимости от длины волны поглощается либо в области объемного заряда, либо в толще полупроводника *p*-типа.

Если все электронно-дырочные пары, созданные падающим на прибор излучением, разделяются полем *p-n* перехода и создают ток во внешней цепи, то эффективность преобразования по току будет максимальной. Эффективность проникающего в полупроводник излучения характеризуется коэффициентом собирания носителей Q, представляющим собой отношение числа разделенных полем *p-n* перехода носителей к числу проникающих в полупроводник фотонов:

$$Q = \frac{I_{к.з}}{qN}, \tag{2}$$

где N — число проникающих в полупроводник фотонов; q — заряд электрона.

При этом предполагается, что один фотон создает в полупроводнике одну электронно-дырочную пару, т. е. квантовый выход фотопреобразования равен единице. Такое предположение справедливо, если энергия фотона меньше чем 2 ΔE, но больше $\Delta E (\Delta E < h\nu < 2\Delta E)$, где h — постоянная Планка, ν — частота излучения. Для идеального ФП коэффициент собирания равен единице во всем диапазоне длин волн, к которому чувствителен данный полупроводник, т. е. в области собственного поглощения. В реальных же приборах за счет различных потерь он меньше единицы. Это отличие вызвано еще и тем, что часть созданных излучением носителей рекомбинирует один с другим или на примесных центрах, не доходя до *p-n* перехода. Потери носителей на рекомбинацию зависят от структуры ФП, геометрических толщин *p*- и *n*-областей, распределения концентрации примесей в *p*- и *n*-областях, диффузионных длин неосновных носителей и др.

p-n структура фотоприемника с однородным распределением примеси. Если ФП имеет структуру с однородным распределением концентрации примеси как в *p*-, так и в *n*-области, то генерируемые светом носители движутся только под влиянием диффузии. Поэтому для такого типа ФП считается, что полем *p-n* перехода разделяется только та часть носителей, которая генерируется на расстоянии от перехода, равном или меньшем диффузионной длины в *p*- и *n*-обла-

сти. Чем дальше от p-n перехода создана пара, тем с меньшей вероятностью она будет разделена и даст ток во внешней цепи. Так как пары создаются как в дырочной, так и в электронной частях p-n перехода, то коэффициент собирания ФП будет состоять из двух частей: $Q = Q_n + Q_p$, где Q_n — коэффициент собирания электронов, созданных в p-области; Q_p — коэффициент собирания дырок, созданных в n-области.

Характер экспериментальных зависимостей Q, Q_n и Q_p от длины волны представлен на рис. 1. Спад Q_n в коротковолновой части спектра связан с влиянием потерь на рекомбинацию в объеме (объемная) и на поверхности ФП (поверхностная рекомбинация). Спад Q_n в области коротких длин волн вызван уменьшением потока излучения, достигающего p-области. Спад в длинноволновой области спектра обусловлен уменьшением поглощения квантов излучения в n-слое и в активной части p-слоя (на расстоянии L_n от p-n перехода), т. е излучение проходит вглубь, слабо поглощаясь. Относительное расположение и величины максимумов кривых Q_n и Q_p зависят от соотношения между геометрическими толщинами p- и n-областей и диффузионными длинами L_n и L_p неосновных носителей в этих областях. Вид кривой Q_p, кроме того, зависит и от скорости поверхностной рекомбинации s Таким образом, положение максимума кривой Q у разных ФП может довольно сильно отличаться.

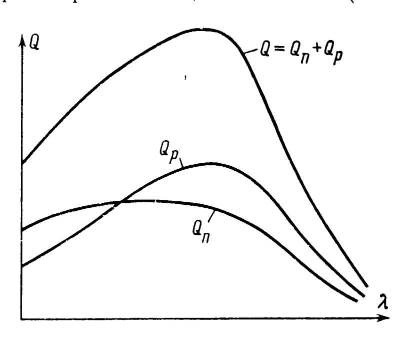


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента собирания ФП.

Коэффициент собирания для тонкобазных ФП, когда толщина базы w (толщина облучаемой области) много меньше диффузионной длины неосновных носителей L, т. е. $w/L \ll 1$, при условии однородного распределения концентрации примесей в базе является функцией параметров αw, sw/D и w/L, где D — коэффициент диффузии неосновных носителей. Параметр αw может быть интерпретирован как отношение толщины базы к средней глубине проникновения падающего излучения $1/\alpha$. Параметры sw/D и w/L характеризуют соответственно потери носителей вследствие поверхностной и объемной рекомбинации. Влияние поверхностной рекомбинации сказывается сильнее при больших коэффициентах поглощения света. При $\alpha w \gg 1$ и при $sw/D \gg 1$ коэффициент собирания убывает обратно пропорционально скорости рекомбинации.

Однородное распределение концентрации примеси в базе ФП на практике реализуется в сплавных ФП (германиевых и кремниевых). К нему приближается распределение примеси для диффузионных ФП, когда в легированном слое имеет место ступенчатый характер распределения с участком постоянной поверхностной концентрации (рис. 2,*а*). Подобный характер распределения концентраций описан в литературе [19, 20] для тонких диффузионных слоев в p- и n-кремнии. Такой вид кривых распределения обусловлен зависимостью скорости диффузии бора и фосфора в кремнии от концентра-

ции примеси. Для ФП с однородной базой трудно получить высокий коэффициент собирания, особенно в коротковолновой области спектра, во-первых, из-за трудности изготовления мелких переходов (для сплавных ФП) и, во-вторых, из-за больших потерь в результате поверхностной и объемной рекомбинации (для диффузионных ФП). Например, для диффузионных ФП с базой 0,5 мкм коэффициент собирания составляет 0,1 при $\lambda=0{,}4$ мкм.

***p-n* структура фотоприемника с неоднородным распределением примеси в одной из областей.** При наличии в базе ФП градиента

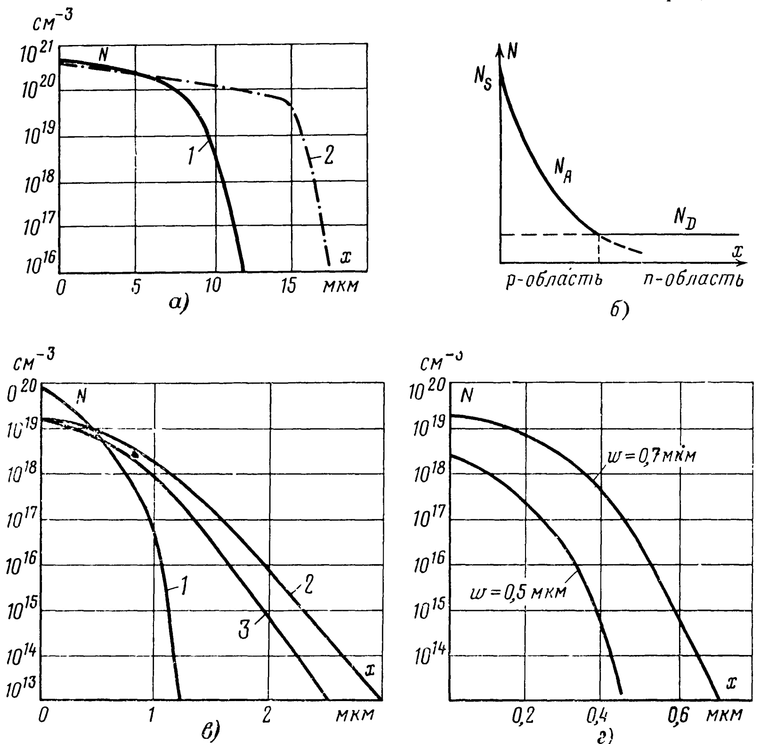


Рис. 2. Распределение концентрации примеси в базе ФП.

а — ступенчатое распределение примеси: *1* — для ФП с толщиной базы 12 мкм, *2* — для ФП с толщиной базы 17 мкм; *б* — экспоненциальное распределение примеси; *в* — распределения примеси в базе ФП, полученные в процессе диффузии. *1*, *2* — теоретические кривые распределения вида

$$N=N_0 \exp\left|\frac{x^2}{4Dt}\right|;$$

3 — теоретическая кривая распределения вида

$$N=N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right);$$

г — распределения примеси в базе ФП, полученные в процессе ионно-лучевого метода легирования.

концентрации примесей возникает внутреннее электрическое поле, пропорциональное градиенту концентрации:

$$E = \frac{kT}{q} \frac{1}{N(x)} \frac{dN(x)}{dx}, \qquad (3)$$

где $N(x)$ — концентрация акцепторов; $dN(x)/dx$ — градиент концентрации примеси в точке x. Это поле ускоряет диффузионное движение носителей к p-n переходу, что увеличивает число разделяемых p-n переходом носителей, а следовательно, и коэффициент собирания по сравнению с его значением у ФП с однородной базой. Фотоприемники при наличии электрического поля в базе называются дрейфовыми. Для них коэффициент собирания при условии постоянного поля в базе p-типа, когда кривая распределения акцепторной примеси предполагается экспоненциальной (рис. 2,*б*), определяется выражением

$$N = N_s e^{-\beta x}, \qquad (4)$$

здесь N_s — поверхностная концентрация акцепторов; β — постоянная, характеризующая крутизну экспоненты, является функцией параметров αw, sw/D_n, βw, где w — толщина базы p-типа, D_n — коэффициент диффузии электронов в базе ФП.

Безразмерный параметр βw характеризует величину тянущего поля в базе. Внутреннее тянущее поле увеличивает коэффициент собирания, однако для небольших значений αw, т. е. для глубоко проникающего излучения, влияние поля на коэффициент собирания мало, так как в этом случае p-слой становится почти прозрачным для излучения и в базе создается очень мало неосновных носителей. В случае сильно поглощаемого излучения (при больших значениях αw) большинство фотонов поглощается в базе p-типа; в результате этого в ней создается много неосновных носителей и, следовательно, влияние внутреннего поля становится более ощутимым. С увеличением скорости поверхностной рекомбинации (с увеличением параметра sw/D) коэффициент собирания уменьшается, так как много неосновных носителей будет теряться на поверхности и не достигнет перехода. Для очень больших значений αw большинство фотонов поглощается в очень тонком приповерхностном слое и, таким образом, большинство неосновных носителей теряется из-за поверхностной рекомбинации и не создает фототока. С увеличением внутреннего поля этот эффект частично компенсируется. При достаточно больших электрических полях, когда безразмерный параметр $\beta w \gg 10$ и скорость поверхностной рекомбинации мала, можно получить для дрейфового ФП в коротковолновой области спектра предельные, теоретически возможные значения коэффициента собирания.

Рассмотренная модель дрейфового ФП с постоянным полем является идеализированной, так как практически получить экспоненциальный профиль распределения примеси в реальных ФП не представляется возможным. На современном уровне технологии изготовления полупроводниковых приборов в легированном слое получают профили: гауссовский и в виде функции ошибок (рис. 2,*в*), зависящие от поверхностной концентрации примеси (N_0), расстояния от поверхности (x), коэффициента диффузии (D) и времени диффузии (t). Такие профили получают в процессе ионно-лучевого (рис. 2,*г*) и диффузионного методов диффузии (рис. 2,*в*).

Для ФП с гауссовским распределением примеси в базе выражение для определения электрического поля E приобретает вид:

$$E = \frac{kT}{q \cdot 2Dt}\, x. \tag{5}$$

Поле, линейно возрастая с ростом x, равно нулю вблизи поверхности и достигает максимальной величины вблизи p-n перехода.

Расчет Q в случае линейно-изменяющегося с расстоянием электрического поля показал, что при достаточно большом поле E (если скорость поверхностной рекомбинации равна нулю) можно получить коэффициент собирания, равный 1.

В последние годы начали появляться более сложные методики расчета ФП с внутренними полями произвольной конфигурации, учитывающие зависимость параметров носителей (подвижности и времени жизни) от их концентрации. Необходимость таких расчетов была вызвана созданием полей сложной конфигурации в реальных ФП.

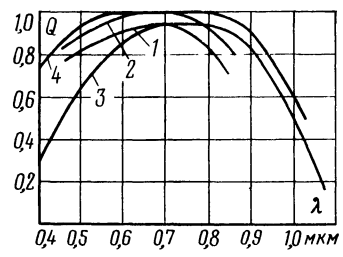


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента собирания ФП от длины волны для гауссовского и ступенчатого распределения примеси в базе.

1, 2 — для ФП, изготовленных методом ионно-лучевой технологии (*1* — $U=0$; *2* — $U=10$ В); *3, 4* — для диффузионных ФП (*3* — ступенчатое; *4* — гауссовское распределение).

Экспериментальная оценка влияния тянущего поля на коэффициент собирания при гауссовском распределении примеси в легированном слое проводилась на кремниевых ФП, полученных методом двухэтапной диффузии фосфора в кремний p-типа (рис. 3, кривая *4*) и методом ионно-лучевого легирования кремния n-типа (рис. 3, кривые *1* и *2*) [22]. Экспериментальные распределения электрически активной примеси (рис. 2,*в*, *г*) совпадают с теоретически рассчитанным гауссовским распределением. Сравнение коэффициентов собирания для диффузионных ФП с разным характером распределения примеси в легированном слое [ступенчатое (рис 3, кривая *3*) и гауссовское распределение (рис. 3, кривая *4*)], при одинаковой глубине p-n перехода (0,7 мкм) показывает преимущества гауссовского распределения, для которого уже при длине волны 0,5 мкм почти все носители, созданные потоком излучения, не рекомбинируя, доходят до p-n перехода, а коэффициент собирания приближается к единице. Создание в легированном слое ФП двухступенчатого распределения примеси, состоящего из двух областей с различной концентрацией, позволяет также значительно увеличить коэффициент собирания ФП в коротковолновой области спектра даже при сравнительно большой глубине залегания p-n перехода, равной примерно 1,2 мкм [21].

Для увеличения коэффициента собирания ФП в длинноволновой области спектра необходимо увеличивать диффузионную длину неосновных носителей в толще полупроводника. Высокий коэффициент собирания в интервале длин волн вплоть до 1,06 мкм можно получить, используя для изготовления ФП материал с большой диф-

фузионной длиной и низкотемпературный (например, ионно-лучевой) метод создания *p-n* перехода.

Фотоприемники с *p-i-n* структурой. Фотоприемники с *p-i-n* структурой представляют собой две тонкие низкоомные *p-* и *n*-области, между которыми расположен достаточно протяженный высокоомный, обедненный свободными носителями слой. Если к такой структуре не приложено внешнее электрическое напряжение, поле в *i*-слое мало и генерируемые в нем носители будут практически двигаться в результате диффузии. Коэффициент собирания такой структуры при условии малой диффузионной длины неосновных носителей в *i*-слое ($L<d$) будет мал из-за значительной рекомбинации. *p-i-n* структура при отсутствии внешнего напряжения аналогична структуре ФП с однородным распределением примеси, где действует диффузионный механизм движения носителей. При обратном смещении *p-i-n* структуры все напряжение будет падать на высокоомном *i*-слое и генерируемые носители под действием сильного поля будут пролетать *i*-слой, не успевая рекомбинировать. При этом коэффициент собирания *p-i-n* структуры $Q=1-e^{-\alpha d}$, где d — толщина *i*-слоя. При $d=1/\alpha$ имеет место почти полное собирание генерируемых носителей.

ИНЕРЦИОННОСТЬ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Инерционность ФП определяется временем пролета носителей от места их генерации до разделения *p-n* переходом и постоянной времени *RC*-цепочки ФП. Рассмотрим влияние каждого из этих факторов.

Влияние времени пролета носителей. Время пролета носителей определяется внутренней структурой ФП. Известны три различных механизма переноса: а) диффузия; б) диффузия при наличии электрического поля; в) дрейф в электрическом поле.

Диффузия является преобладающим механизмом переноса носителей для ФП с равномерным распределением примеси в *p-* и *n*-областях, когда толщина области объемного заряда при обратном смещении предполагается достаточно тонкой, так что время дрейфа через нее можно не учитывать (рис. 4,*а*). Более выгодна с точки зрения уменьшения инерционности конструкция ФП, в которой базой служит материал *p*-типа, так как диффузионная постоянная электронов D_n обычно больше диффузионной постоянной дырок. Для ФП с толщиной *p*-области $w=1/\alpha$, но меньшей диффузионной длины неосновных носителей, рекомбинацией в *p*-области можно пренебречь. Если учитывать поглощение только в *p*-области, то среднее время пролета носителей в базе будет равно:

$$t=w^2/2D_n. \qquad (6)$$

Это время определяет инерционность ФП с однородным распределением примеси для монохроматического излучения. При учете поглощения, которое происходит по обе стороны от *p-n* перехода (для длинноволнового или немонохроматического излучения) инерционность будет определяться наибольшим временем пролета носителей в одной из областей. Все сказанное справедливо, если постоянная времени, определяемая *RC*-цепочкой ФП, намного меньше времени пролета носителей. Малоинерционные ФП обычно изготовляются таким образом, что постоянная времени *RC*-цепочки будет

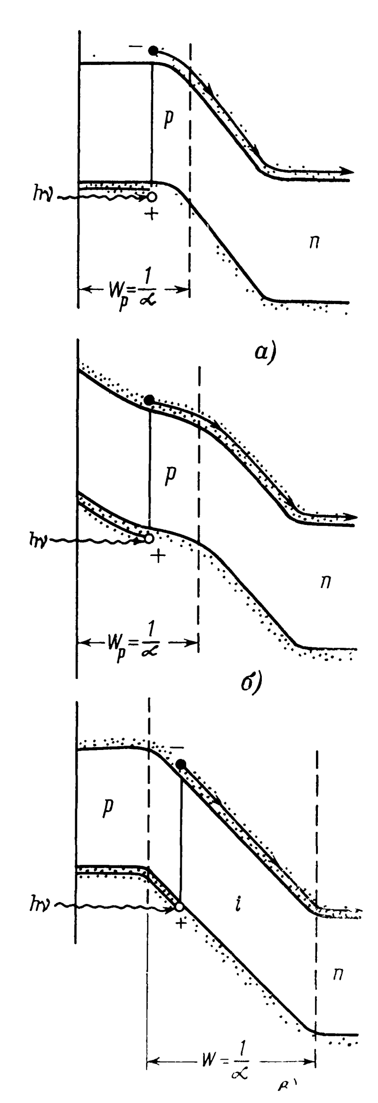


Рис. 4 Энергетическая диаграмма зонной структуры ФП с *p-n* переходом.

а — для *p-n* структуры с равномерным распределением примеси в *p-* и *n-*областях; *б* — для дрейфового ФП; *в* — для ФП с *p-i-n* структурой

на порядок меньше времени пролета. Таким образом, предельная частота таких ФП определяется временем пролета носителей и не превышает в лучшем случае десятков мегагерц.

Механизм переноса путем диффузии при наличии электрического поля имеет место в дрейфовых ФП с градиентом примеси в одной или двух областях *p-n* перехода (рис. 4,*б*). Градиент концентрации примесей создает внутреннее электрическое поле, ускоряющее движение носителей к *p-n* переходу Это уменьшает время пролета, а следовательно, и инерционность ФП Для идеализированного дрейфового ФП с *p-n* структурой с постоянным внутренним электрическим полем и экспоненциальным профилем распределения примеси времена пролета при достаточно высоких полях. можно уменьшить на порядок по сравнению с ФП, обладающим однородным распределением примеси в базе Градиент концентрации примесей в базе снижает не только время пролета носителей, но и постоянную времени *RC*-цепочки ФП. Таким образом, дрейфовый ФП, обладая высоким коэффициентом собирания, близким к предельно возможной величине в коротковолновой области спектра, может быть малоинерционен для излучения, поглощаемого в базе Для этой области спектра подобная структура прибора является оптимальной как по эффективности, так и с точки зрения инерционности

Механизм переноса путем дрейфа в электрическом поле наблюдается в *p-i-n* структуре, смещенной в обратном направлении (рис. 4,*в*). Толщина *n*-области, на которую падает излучение, предполагается достаточно малой, так что большая часть излучения поглощается в *i*-области. Если в *i*-слое, где поле *E* постоянно, пре-

небречь рекомбинацией носителей, критическая частота ФП с *p i-n* структурой (частота, при которой амплитуда сигнала уменьшается на 30%) для однородной генерации[1] носителей в *i*-слое определяется следующим образом:

$$f_{\text{крит}} = \frac{1,7 \cdot 2\mu U}{d^2 \cdot 2\pi}, \qquad (7)$$

где μ — подвижность носителей; U — приложенное к *p-i-n* структуре обратное смещение. Если подвижности электронов и дырок не равны, то частотная чувствительность определяется скоростью более медленно двигающихся носителей.

В реальных ФП, где коэффициент поглощения отличен от нуля или бесконечности, в движении через *i*-слой принимают участие как дырки, так и электроны, и, следовательно, время пролета определяется медленно двигающимися носителями — дырками Так как коэффициент поглощения имеет конечную величину, изменяющуюся в некотором интервале значений, генерация носителей происходит во всех частях *i*-слоя, т. е. ее можно считать однородной, а среднее время пролета носителей $t = d/2v$, где v — скорость дрейфа

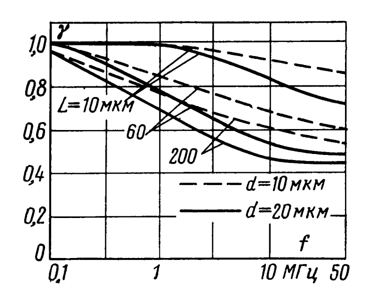


Рис. 5. Расчетные частотные характеристики ФП с тонкой базой для различных толщин области объемного заряда и диффузионных длин.

В случае широкой *i*-области ($d = 0,2$ мм) с удельным сопротивлением в несколько десятков килоом при небольших обратных напряжениях (не более 50 В) область объемного заряда расширяется на весь *i*-слой, а критическая частота ФП ограничивается 30 МГц

В случае узкой *i*-области ($d = 0,05$ мм) с удельным сопротивлением порядка 1000 Ом · см при обратном смещении 50 В значения $f_{\text{крит}}$ доходят до 400 МГц.

Таким образом, уменьшая область объемного заряда и увеличивая электрические поля, можно значительно повысить критическую частоту *p-i-n* структуры.

В реальных ФП, изготовленных из высокоомного кремния, для достаточно длинноволнового излучения, которое проникает как в область объемного заряда, так и в область за *p-n* переходом, при небольших величинах обратного смещения имеют место два механизма переноса носителей: диффузия и дрейф носителей. Расчет частотной характеристики в случае синусоидально модулированного потока, проведенный для модели ФП с тонкой базой при облучении его длинноволновым излучением ($\lambda = 0,91$ мкм), показал, что критические частоты увеличиваются с ростом толщины обедненного слоя. На рис. 5 γ представляет отношение фототока для синусоидально модулированного потока с частотой f к величине фототока при постоянной засветке. Увеличение диффузионной длины приводит

---

[1] Под однородной генерацией понимают образование электронно-дырочных пар равномерно по всему *i*-слою.

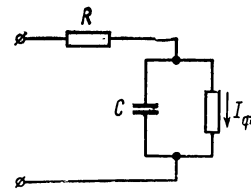


Рис. 6. Простейшая эквивалентная схема ФП.

к ухудшению характеристик, причем для малых толщин это влияние оказывается особенно существенным Это объясняется тем, что эффективная область, из которой происходит диффузионное собирание носителей, зависит от частоты (при ее увеличении толщина области уменьшается), в то время как обедненная область характеризуется полным собиранием носителей независимо от частоты в соответствии с предположением о безынерционном механизме последнего.

Постоянная времени, определяемая *RC*-параметрами. Вторым фактором, оказывающим влияние на инерционность ФП, является постоянная времени, определяемая *RC*-цепочкой ФП, где *R* и *C* — параметры эквивалентной схемы ФП (рис. 6), причем *C* — емкость *p-n* перехода ФП, а *R* — последовательное сопротивление прибора Очевидно, что уменьшения инерционности ФП можно достигнуть уменьшением величин *R* и *C*. Рассмотрим каждый из этих параметров в отдельности Прибор с *p-n* переходом подобен конденсатору, для которого *p*- и *n*-области представляют собой разноименно заряженные пластины, а область объемного заряда — разделяющий их диэлектрик Ширина области объемного заряда меняется в зависимости от величины приложенного напряжения С ростом величины обратного смещения ширина области объемного заряда увеличивается и емкость *C* уменьшается Емкость ФП можно определить по формуле для плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \tag{8}$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; ε — диэлектрическая проницаемость полупроводника; *S* — площадь *p-n* перехода.

Ширина области объемного заряда, а следовательно, и емкость однозначно связана с распределением примеси в *p*- и *n*-областях, т. е. со структурой прибора Для ФП с однородным распределением примеси в *p*- и *n*-областях и несимметричным *p-n* переходом[1] ширина области объемного заряда определяется высокоомной областью. В этом случае емкость кремниевых ФП можно рассчитать по удельному сопротивлению кремния и напряжению смещения на приборе, если обратные смещения достаточно велики

$$C_1 = \frac{202}{\sqrt{\rho_n U}} \text{ и } C_2 = \frac{326}{\sqrt{\rho_p U}}, \tag{9}$$

где C_1 — емкость *p-n* перехода с высокоомной областью *n*-типа, пФ/мм^2; C_2 — емкость *p-n* перехода с высокоомной областью *p*-типа, пФ/мм^2; ρ_n, ρ_p — удельное сопротивление высокоомных *n*- и *p*-областей соответственно, Ом · см. Снижение емкости ФП можно обеспечить, увеличивая удельное сопротивление одной из областей *p-n* перехода.

---

[1] *p-n* переход считается несимметричным (резким), если в одной из областей (*p* или *n*) концентрация примеси значительно больше, чем в другой.

$$R_б = \frac{1}{3}\frac{\rho l_1}{w l_2}$$

$$R_б = \frac{1}{12}\frac{\rho l_1}{w l_2}$$

$$R_б = \frac{256}{\pi^6}\frac{\rho l_1 l_2}{w(l_2^2 + l_1^2)}$$

$$R_б = \frac{256}{\pi^6}\frac{\rho}{w}\frac{l_2 l_1}{(4l_2^2 + l_1^2)}$$

$$R_б = \frac{64}{\pi^6}\frac{\rho}{w}\frac{l_1 l_2}{(l_1^2 + l_2^2)}$$

$$R_б = \frac{1}{8\pi}\frac{\rho}{w}$$

Рис. 7. Фотоприемники с различной конфигурацией контактов и соответствующие им сопротивления базы.

Для дрейфового ФП, в базе которого имеет место неоднородное распределение примеси, ширина области объемного заряда (а соответственно и емкость) будет определяться другими выражениями, чем в предыдущем случае. Если в базе ФП примесь распределена экспоненциально, то при достаточно сильных внутренних полях можно предположить, что область, где расположен переход, имеет почти линейное распределение примеси (при небольших обратных смещениях). Расчет емкости дрейфового ФП показывает, что ее величина может быть значительно уменьшена по сравнению с ФП с однородной базой.

Емкость ФП с *p-i-n* структурой при достаточно больших величинах обратного смещения определяется только шириной *i*-слоя. Для кремниевых приборов она равна:

$$C = 106/d, \qquad (10)$$

где d измеряется в мкм, C — в пФ/мм^2.

Таким образом, наименьшие значения емкости обеспечиваются в дрейфовых ФП и при использовании *p-i-n* структуры.

Последовательное сопротивление фотоприемника в общем случае включает сопротивление растекания носителей в тонком базовом слое или сопротивление базы $R_б$, сопротивление толщины полупроводника за *p-n* переходом или сопротивление коллектора $R_к$ и сопротивления контактов (переходные сопротивления между полупроводником и металлическими контактами).

Обычно при совершенных омических контактах их сопротивлениями можно пренебречь. При небольших частотах $\omega\tau_{RC} \ll 1$ сопротивление базы можно считать омическим; в этом случае справедлива простейшая эквивалентная схема, приведенная на рис. 6. Сопротивление базы будет зависеть от удельного сопротивления базового слоя, толщины базы и формы контактов на поверхности ФП. Для ФП прямоугольной формы с контактом в виде узкой полоски, расположенной вдоль одной из сторон (рис. 7), сопротивление базы равно:

$$R_б = \frac{1}{3}\frac{l_1}{l_2}\frac{\bar{\rho}}{w}, \qquad (11)$$

где l_2 — ширина прибора; l_1 — длина прибора без учета контакта; $\bar{\rho}$ — усредненное по сечению удельное сопротивление базового слоя.

На рис. 7 приведены также ФП прямоугольной и круглой формы с различным расположением контактов и соответствующие им сопротивления базы $R_б$.

Для любой конфигурации ФП сопротивление базы можно снизить, уменьшая параметр $\bar{\rho}/w$, т. е. используя толстую базу с вы-

сокой концентрацией примеси. С увеличением толщины базы, однако, увеличивается время пролета носителей в ней, что в свою очередь ухудшает частотные свойства ФП. Чтобы ликвидировать это противоречие, необходимо выбирать оптимальный вариант толщины базы w.

Сопротивление толщины полупроводника за *p-n* переходом, или сопротивление коллектора, равно:

$$R_к = \rho \frac{w_к}{S}, \qquad (12)$$

где ρ — удельное сопротивление коллектора; $w_к$ — толщина коллектора; S — площадь *p-n* перехода.

Сопротивление $R_к$ особенно существенно для ФП на основе высокоомного кремния с малой площадью *p-n* перехода. Чтобы уменьшить его сопротивление, необходимо уменьшать толщину ФП и работать в фотодиодном режиме при таких величинах обратного смещения, чтобы область объемного заряда расширялась на всю толщину коллектора $w_к$. В этом случае такой ФП приближается к *p-i-n* структуре, являющейся оптимальной с точки зрения получения малых сопротивления и емкости прибора, а также малого времени пролета носителей. Структура *p-i-n* является одной из основных структур высокочастотных фотодиодов.

Рассмотрение основных факторов, влияющих на коэффициент собирания и инерционность ФП, показывает, что, с одной стороны, для увеличения коэффициента собирания необходимо увеличивать диффузионные длины в *p-* и *n*-областях и ширину области объемного заряда, с другой, для снижения инерционности нужно уменьшать эти параметры, чтобы получить малые времена пролета. Это противоречие свидетельствует о том, что невозможно создать универсальный ФП, который имел бы высокую чувствительность в широком диапазоне длин волн спектра и малую инерционность вплоть до частот в несколько ГГц. Поэтому в зависимости от конкретных условий применяют различные типы ФП, основные параметры и характеристики которых будут рассмотрены ниже.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЕМНИКОВ

В этом разделе рассмотрены наиболее общие параметры и характеристики, присущие всем типам фотоприемников с *p-n* переходом, а также дано описание некоторых ФП, таких как «Фотовольт», координатно-чувствительный фотоэлемент, фотоварикап и др., и приведены их специфические параметры.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Обычно для ФП пользуются двумя понятиями чувствительности: интегральной и монохроматической. Интегральная чувствительность — отношение величины фототока ФП (мА) к световому потоку (лм) от источника с цветовой температурой $T_{цв}=2850$ К (источник типа А). Эта чувствительность характеризует качество работы ФП только по отношению к источникам излучения, близким по своему спектральному составу к источнику А (как правило, вольфрамовые лампы накаливания). Пользуясь этим параметром, нельзя оценить, как

будет работать ФП с каким-либо другим источником. Для кремниевых приборов интегральная чувствительность лежит в пределах 4—9 мА/лм, для германиевых — 15—25 мА/лм [8]. Монохроматическая чувствительность — отношение величины фототока (мА) к величине световой энергии излучения (мВт), соответствующей определенной длине волны. Монохроматическая чувствительность характеризует эффективность работы ФП с монохроматическим источником излучения

В связи с появлением в последнее время когерентных источников различных типов в области длин волн от 0,4 до 1,153 мкм знание монохроматической чувствительности приборов в этом интервале длин волн представляет особый интерес. Зависимость монохроматической чувствительности от длины волны излучения представляет собой спектральную характеристику ФП. Знание спектральной характеристики важно не только для оценки работы ФП с когерентными источниками, но также и с некогерентными источниками (светодиоды, лампы накаливания), спектральный состав излучения которых известен. Выражение для спектральной характеристики реального ФП можно записать в виде

$$I_ф/E=(1-R)Q\beta qN, \quad (13)$$

где $I_ф$ — фототок; E — энергия при длине волны λ; R — коэффициент отражения от поверхности ФП; Q — коэффициент собирания; β — квантовый выход; N — число фотонов, приходящихся на единицу световой энергии. Полагая $\beta=1$, можно получить:

$$I_ф/E=(1-R)Q\lambda/1{,}24. \quad (14)$$

Спектральная характеристика идеального ФП представляет собой треугольник (рис. 8, кривая *1*), внутрь которого вписываются все экспериментальные кривые. Вид спектральной характеристики реального ФП определяется в основном зависимостью коэффициента собирания ФП от длины волны. Как было показано в предыдущем разделе, коэффициент собирания определяется структурой ФП, а также такими параметрами полупроводникового материала, как диффузионные длины неосновных носителей, коэффициент поглощения света, ширина запрещенной зоны полупроводника. Используя для изготовления ФП полупроводниковые материалы с различной шириной запрещенной зоны, можно изменять область длин волн, в которой работает ФП

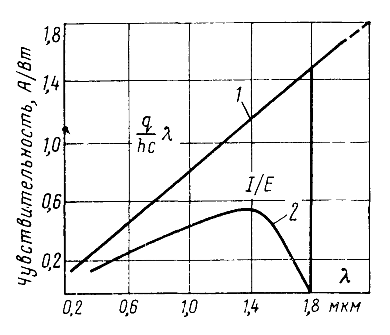


Рис 8 Спектральная характеристика идеального (*1*) и реального (*2*) германиевого ФП.

Для широкозонных полупроводников (с большой шириной запрещенной зоны), например GaAs, спектральная характеристика смещается в сторону более коротких длин волн, так как для создания электронно-дырочных пар, а следовательно, фототока необходимы фотоны света с большей энергией (коротковолновое излучение). Для полупроводников с малой шириной запрещенной зоны, напри-

мер Ge, спектральная характеристика сдвинута в длинноволновую область и $\lambda_{макс}=1{,}55$ мкм (рис. 8, кривая *2*). В указанных полупроводниках электронно-дырочные пары могут возникать под действием фотонов с меньшей энергией (длинноволновое излучение).

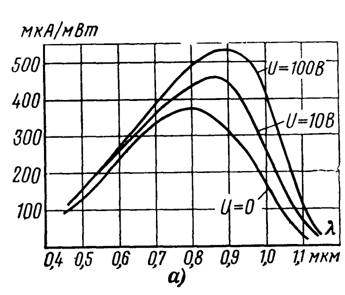
Большое влияние на вид спектральной характеристики и положение максимума оказывает зависимость коэффициента поглощения света от длины волны. Для полупроводников с резкой зависимостью коэффициента поглощения от длины волны, например Ge, максимум спектральной характеристики для различных типов приборов имеет место, как правило, при одной и той же длине волны света независимо от технологии. Для полупроводников с менее резкой зависимостью коэффициента поглощения, например Si, максимум спектральной характеристики в зависимости от конструкции ФП и используемой технологии может изменяться в широком диапазоне от коротких длин волн (примерно 0,6 мкм) вплоть до края собственного поглощения (примерно 1,1 мкм).

Сравнивая возможности таких материалов, как Si и GaAs, можно видеть, что основное влияние на спектральную характеристику оказывают различия в механизме поглощения света. Для GaAs характерен резкий край основной полосы поглощения и слабая зависимость коэффициента поглощения от длины волны в интервале 0,4—0,9 мкм. В связи с этим в ФП из GaAs величина фототока определяется преимущественно базой (глубиной залегания *p-n* перехода) прибора. Поэтому, изменяя толщину базы w, можно изменять форму спектральной характеристики арсенид галлиевых ФП. Для ФП с базой, меньшей 1 мкм, максимум кривой имеет место при длине волны $\lambda=0{,}65$ мкм. С увеличением толщины базы максимум смещается в длинноволновую область: при $w=1$ мкм, $\lambda_{макс}=0{,}74$ мкм, при $w>1$ мкм, $\lambda_{макс}=0{,}85$ мкм [23].

Для наиболее распространенных кремниевых ФП сдвиг максимума спектральной характеристики можно осуществить как изменением толщины базы, так и изменением диффузионных длин неосновных носителей в базе и коллекторе, т. е. в области за *p-n* переходом. Сохраняя неизменной толщину базы и меняя диффузионную длину неосновных носителей в исходном кремнии, можно изменить максимум спектральных кривых как по абсолютной величине, так и по длине волны излучения. Если диффузионная длина в толще кремния велика (свыше 200 мкм) и остается неизменной в процессе технологии изготовления, то при изменении толщины базы максимум спектральных кривых не изменяется и, как правило, сдвинут в длинноволновую область (примерно 1 мкм), а форма кривых приближается к идеальной — треугольной; при этом по абсолютной величине спектральные характеристики могут отличаться. Такой вид характеристик, как правило, наблюдается у кремниевых ФП с малыми глубинами *p-n* перехода, изготовленных методом ионно-лучевой технологии. Для небольших диффузионных длин неосновных носителей (не выше 60 мкм) максимум чувствительности спектральных кривых может смещаться при изменении толщины базы. Если для повышения чувствительности в длинноволновой области спектра необходимо увеличивать диффузионную длину неосновных носителей в исходном кремнии, то повышение коротковолновой чувствительности можно обеспечить при создании тянущих полей в базе ФП. Второй способ повышения коротковолновой чувствительности — создание области объемного заряда вблизи поверхности ФП. При этом генерируемые фотонами света электронно-дырочные пары попадают в область поля

и разделяются им, не успевая рекомбинировать. Подобный случай реализуется в поверхностно-барьерных ФП. Чувствительность у таких приборов в интервале длин волн $\lambda=0,2\div0,4$ мкм превышает чувствительность дрейфовых ФП.

Изменение и сдвиг максимума спектральной характеристики можно также осуществить, переходя от вентильного режима работы ФП к фотодиодному. Для кремниевых ФП с малыми диффузионными длинами неосновных носителей в исходном материале ($L<$ <60 мкм) с ростом обратного смещения максимум спектральных кривых увеличивается по абсолютной величине и сдвигается в длинноволновую область (рис. 9,*а*).



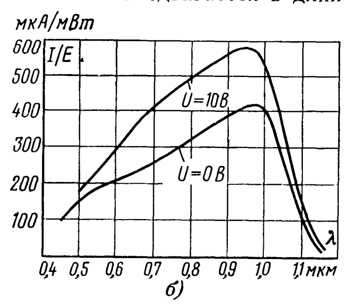


Рис. 9. Спектральные характеристики кремниевого ФП при различных величинах обратного смещения.

а — **при отсутствии глубоких примесных центров;** *б* — **с глубокими примесными центрами.**

Такое поведение спектральных кривых характерно для ФП на основе высокоомного кремния, у которых с увеличением обратного смещения увеличивается ширина области объемного заряда, а следовательно, и толщина области, в которой происходит собирание носителей без потерь, что и увеличивает чувствительность Сдвиг максимума кривых в длинноволновую область объясняется расширением области объемного заряда в сторону высокоомного исходного кремния (в область коллектора), куда проникает длинноволновое излучение. Для ФП с большой диффузионной длиной неосновных носителей ($L>100$ мкм) с увеличением обратного смещения сдвига максимума спектральных кривых не наблюдается, а увеличение абсолютной величины чувствительности незначительно. При наличии в широкой области объемного заряда ФП глубоких центров, на которых имеет место интенсивная рекомбинация, может наблюдаться резкое увеличение монохроматической чувствительности во всей рабочей области спектра при переходе от фотовольтаического режима работы к фотодиодному даже при малых обратных смещениях. На рис. 9,*б* в качестве примера приведены спектральные характеристики подобного кремниевого ФП.

Другим фактором, определяющим чувствительность приборов, является коэффициент отражения излучения от поверхности ФП. Так, например, от полированной поверхности Si отражается до 40% падающей на нее световой энергии. Применение специальных покрытий дает возможность уменьшить коэффициент отражения до 5—10% [24], а следовательно, увеличить чувствительность во всей области спектра. Монохроматическая чувствительность лучших ФП в области длин волн 0,5—0,9 мкм близка к теоретически возможной.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Изменение спектральных характеристик ФП от температуры, в основном, обусловлено температурной зависимостью коэффициента собирания. Последняя в свою очередь определяется температурными изменениями коэффициента поглощения света, ширины запрещенной зоны полупроводника, диффузионной длины неосновных носителей, а для некоторых типов ФП — изменениями ширины области объемного заряда и режимом работы прибора. С увеличением температуры ширина запрещенной зоны полупроводника уменьшается и условия образования электронно-дырочных пар фотонами с меньшей энергией облегчаются, т. е. край собственного поглощения полупроводника смещается в длинноволновую область спектра. С понижением температуры ширина запрещенной зоны увеличивается, для ее преодоления и создания пар электрон — дырка требуются фотоны с большей энергией, а следовательно, край собственного поглощения полупроводника смещается в коротковолновую область. В связи с этим спектральная характеристика ФП с понижением температуры смещается в сторону коротких длин волн, с повышением температуры — в длинноволновую область. Для Si изменение ширины запрещенной зоны с температурой считается линейным с наклоном — $4\cdot10^{-4}$ эВ/°С, для Ge зависимость ширины запрещенной зоны от температуры квадратичная.

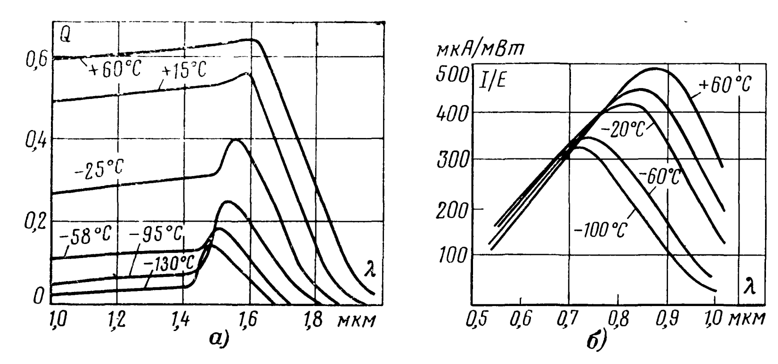


Рис. 10. Влияние температуры на параметры ФП.
а — зависимость коэффициента собирания германиевых фотодиодов от длины волны; *б* — спектральные характеристики кремниевого ФП.

На рис. 10,*а* приведена зависимость коэффициента собирания германиевых фотодиодов (ФД) от длины волны для нескольких температур, откуда видно, что с падением температуры максимум сдвигается в сторону коротких длин волн. Своеобразная форма спектральной кривой германиевых фотодиодов при низких температурах является следствием сильной температурной зависимости скорости поверхностной рекомбинации. Для кремниевых ФП также наблюдается аналогичный сдвиг максимума спектральных кривых с изменением температуры, но в коротковолновой области изменение чувствительности с температурой незначительной (рис. 10,*б*).

Кроме изменения ширины запрещенной зоны полупроводника с температурой наблюдается также изменение коэффициента поглощения света и соответственно изменение глубины проникновения света в полупроводник. С понижением температуры коэффициент поглощения света уменьшается, что увеличивает глубину проникновения фотонов излучения в полупроводник. С повышением температуры глубина проникновения света уменьшается. В связи с этим в зависимости от температуры поглощение света происходит в различных областях ФП и кривая изменения коэффициента собирания, а соответственно и спектральная характеристика при изменении температуры имеют различный характер. Если при комнатной температуре поглощение коротковолнового излучения происходит в базе ФП ближе к поверхности, то с понижением температуры поглощение будет происходить либо в базе ближе к *p-n* переходу, либо в области объемного заряда перехода; при этом создаваемые светом электронно-дырочные пары будут разделяться *p-n* переходом, не успевая рекомбинировать. Соответственно с уменьшением потерь на объемную и поверхностную рекомбинацию чувствительность к коротковолновой области спектра с понижением температуры увеличивается. Особенно сильно подобное изменение чувствительности проявляется для ФП с тонкой базой, с увеличением же толщины базы этот эффект выражен более слабо. С повышением температуры чувствительность в коротковолновой области спектра уменьшается, так как увеличивается число фотонов, поглощаемых вблизи поверхности, и соответственно увеличиваются потери на рекомбинацию. Длинноволновое излучение при низких температурах проникает глубже в полупроводник. При этом создаваемые фотонами света электроны и дырки, рекомбинируя друг с другом, погибают, не успевая дойти до *p-n* перехода, в результате чего чувствительность уменьшается.

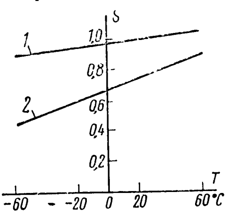


Рис. 11. Экспериментальная зависимость чувствительности в отн. ед. кремниевого ФП от температуры для двух длин волн излучения.

1 — для $\lambda=0,85$ мкм;
2 — для $\lambda=0,95$ мкм.

С повышением температуры чувствительность в длинноволновой области спектра увеличивается, так как увеличивается число фотонов, поглощаемых вблизи *p-n* перехода.

На рис. 11 приведена экспериментальная зависимость чувствительности кремниевого ФП от температуры для двух длин волн излучения: *1* — для длины волны $\lambda=0,85$ мкм, соответствующей максимуму спектральной кривой, и *2* — для длины волны $\lambda=0,95$ мкм [25]. Температурная зависимость чувствительности имеет линейный характер, причем для длинноволнового излучения наблюдается более резкая зависимость от температуры. Такое отличие в изменении чувствительности для двух длин волн можно объяснить различным характером поглощения света. Для длины волны $\lambda=0,85$ мкм поглощение происходит, в основном, в области объемного заряда, где отсутствует рекомбинация носителей, а для $\lambda=0,95$ мкм свет поглощается за областью *p-n* перехода (в коллекторе), где имеет место рекомбинация носителей.

Спектральные характеристики ФП с глубокими энергетическими уровнями [26] изменяются с температурой в зависимости от режима

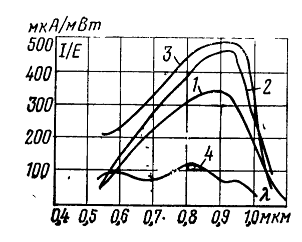


Рис. 12. Спектральные характеристики ФП с глубокими уровнями при различных температурах.

1 — при $U=0$ $T=+20°С$; *2* — при $U=50$ В $T=+20°С$; *3* — при $U=50$ В $T=-100°С$; *4* — при $U=0$ $T=-100°С$.

работы ФП. При низких температурах (—100 °С) толщина области объемного заряда довольно большая (примерно 300 мкм). При работе ФП в фотовольтаическом режиме поле в этой области настолько мало, что время пролета носителей в ней соизмеримо, а иногда и больше времени жизни неосновных носителей. В результате большая часть создаваемых светом носителей рекомбинирует друг с другом не влияя на величину фототока. Спектральная чувствительность в этом случае значительно меньше, чем у обычных кремниевых ФП (рис. 12, кривая *4*). В фотодиодном режиме работы поле в области объемного заряда сильно возрастает, создаваемые светом носители двигаются под действием поля, не успевая рекомбинировать, и чувствительность ФП увеличивается в несколько раз (рис. 12, кривая *3*). Для такого ФП с широкой областью объемного заряда снижение чувствительности в длинноволновой области спектра вызвано уменьшением коэффициента поглощения света в кремнии. Максимум спектральных кривых ФП в этом случае смещается с изменением температуры незначительно.

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Вольт-амперная характеристика ФП представляет собой зависимость тока через прибор от величины приложенного к нему электрического напряжения. Различают вольт-амперную характеристику темновую и освещенного ФП. Знание темновой вольт-амперной характеристики важно для оценки работы ФП как в фотовольтаическом (ФПВ), так и в диодном режимах (ФД). Разные режимы работы ФП определяют соответствующие требования к вольт-амперной характеристике приборов. Для преобразователей солнечной энергии в электрическую (ФЭП)[1] высокий к. п. д определяется крутизной прямой ветви вольт-амперной характеристики [28]. Выражение для темнового тока можно записать в виде

$$I=I_0(e^{qU/AkT}-1), \qquad (15)$$

где I — ток, пропускаемый через *p-n* переход; I_0 — ток насыщения; A — параметр, характеризующий *p-n* переход.

Параметр A определяется природой тока через *p-n* переход и может быть равным 1—3. Для кремниевых ФЭП этот параметр лежит в интервале от 2 до 3. Ток насыщения, в основном, изменяется в пределах 10^{-5}—10^{-7} А/см^2, что превышает величину, определяемую теоретически. С увеличением температуры от —70 до 0° С

[1] Фотоприемник, предназначенный для преобразования солнечной или лучистой энергии любого другого излучателя в электрическую, используемый как генератор электрической мощности, в дальнейшем будет называться фотоэлектрическим преобразователем (ФЭП).

ток насыщения кремниевых приборов изменяется незначительно, в области же положительных температур резко возрастает. Параметр A с уменьшением температуры увеличивается. Для ФЭП на основе GaAs при том же параметре $A \approx 2$ величина тока I_0 лежит в пределах 10^{-9}—$5 \cdot 10^{-10}$ А/см², т. е. в достаточной мере соответствует теории.

Разница в величинах тока насыщения на несколько порядков для GaAs и Si ФЭП оказывает влияние на характеристики этих приборов при работе в фотовольтаическом режиме. На рис. 13 приведены вольт-амперные характеристики ФЭП из GaAs и Si при $T = 300$ K и освещении приборов лучистым потоком мощностью 800 Вт/м² Из сравнения характеристик видна следующая особенность элементов: напряжение холостого хода $U_{\text{х х}}$ для приборов из GaAs при комнатной температуре в 1,6—1,7 раза превышает значение $U_{\text{х х}}$ для кремниевых элементов, хотя ширина запрещенной зоны $\Delta E_{g(\text{GaAs})}$ примерно лишь в 1,25 раза больше $\Delta E_{g(\text{Si})}$ при той же температуре Величина $U_{\text{х х}}$ может быть выражена через фототок $I_{\text{ф}}$, ток насыщения I_0 и параметр A

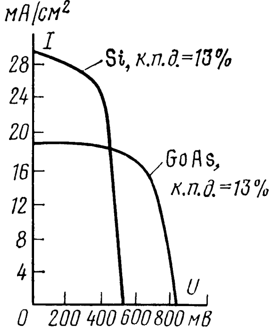


Рис. 13. Вольт-амперные характеристики ФЭП из GaAs и Si.

$$U_{\text{х.х}} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{\text{ф}}}{I_0} + 1 \right). \tag{16}$$

Меньший на несколько порядков ток насыщения I_0 обусловливает дополнительное увеличение напряжения холостого хода $U_{\text{х х}}$ для ФЭП на основе GaAs.

Эксплуатационными параметрами ФЭП являются: напряжение холостого хода $U_{\text{х х}}$, ток короткого замыкания $I_{\text{к.з}}$ и к. п. д. для максимальной мощности. Значение фототока короткого замыкания ФЭП определяется соотношением

$$I_{\text{к.з}} = \frac{SW}{1 + \frac{R_{\text{п}}}{R_{p\text{-}n}}}, \tag{17}$$

где S — интегральная чувствительность ФЭП; W — мощность потока лучистой энергии.

Сопротивление p-n перехода зависит от энергетической освещенности. При малых лучистых потоках $R_{p-n} \gg R_{\text{п}}$ и $I_{\text{к з}} = SW$, т. е. ток короткого замыкания линейно зависит от W С увеличением лучистого потока, падающего на ФЭП, R_{p-n} уменьшается и соотношение (17) станет нелинейным. Низкое $R_{\text{п}}$ позволяет сохранить неравенство до более высоких значений W.

Максимальная мощность ФЭП численно равна площади наибольшего прямоугольника, который вписывается в вольт-амперную характеристику. Вообще, чем ближе форма вольт-амперной характеристики к прямоугольной, тем больше к. п. д. При этом оптимальным сопротивлением нагрузки ФЭП является нагрузка, на ко-

торой выделяется максимальная мощность ФЭП Отношение максимальной мощности ФЭП к произведению $U_{\text{х х}} I_{\text{к з}}$ называется коэффициентом заполнения вольт-амперной характеристики ФЭП. Напряжение холостого хода линейно уменьшается с повышением температуры, в то время как ток короткого замыкания линейно возрастает (рис. 14) [27]. Изменение напряжения холостого хода может быть объяснено быстрым увеличением тока насыщения при

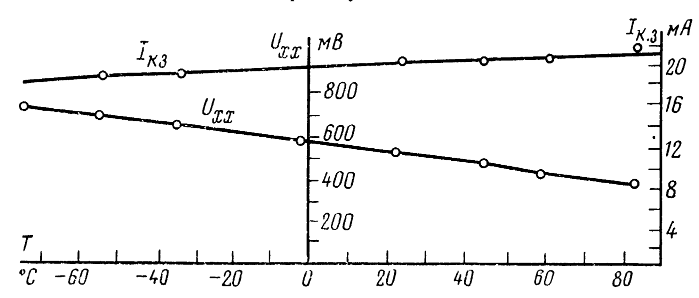


Рис. 14. Зависимость напряжения холостого хода и тока короткого замыкания кремниевого ФЭП от температуры.

повышении температуры. Экспериментальные значения изменения напряжения холостого хода составляют 1,9—2,5 мВ/°С и несколько меняются от элемента к элементу, но постоянны для каждого прибора в большом интервале освещенностей и температур. Изменения тока короткого замыкания обусловлены теми же причинами, что и для спектральных характеристик. Относительное изменение тока короткого замыкания $\Delta I_{\text{ф}}/(I_{\text{ф}}\Delta T)$ также представляет собой постоянную величину, равную $(1{,}5\div 3)\cdot 10^{-3}$°С$^{-1}$, несколько меняющуюся от элемента к элементу. Абсолютное изменение тока короткого замыкания составляет $2\cdot 10^{-5}$ А/см^2°С. Однако ток короткого замыкания с температурой увеличивается медленнее, чем падает $U_{\text{х х}}$, и это приводит к тому, что отдаваемая мощность имеет отрицательную температурную зависимость.

Для ФД важно знание обратной ветви вольт-амперной характеристики. Величина обратного темнового тока определяет порог чувствительности фотодиода. Чем меньше величина обратного темнового тока, тем выше порог чувствительности и тем эффективнее фотодиод, особенно при низких освещенностях.

Как следует из элементарной теории *p-n* перехода, обратный темновой ток через *p-n* переход вызван диффузией неосновных носителей из *p-* и *n*-областей и равен току насыщения I_0. В соответствии с теорией ток насыщения I_0 должен быть очень мал (примерно 10^{-10} А/см^2) и не должен зависеть от напряжения. Экспериментально подобный характер изменения темнового тока наблюдается для германиевых ФД. Для кремниевых ФД экспериментальные значения тока и зависимость его от температуры и напряжения несколько отличаются от теоретических. Зависимость обратного тока от напряжения можно получить, если предположить, что в области объемного заряда имеются центры генерации носителей, которые дают дополнительное увеличение обратного тока и поток которых определяет плотность тока генерации $I_{\text{ген}}$. Величина тока генерации

пропорциональна толщине области объемного заряда и является функцией энергетического положения центров генерации и температуры. Теоретически для резких *p-n* переходов величина тока изменяется пропорционально корню квадратному из обратного напряжения. Экспериментальные данные для кремниевых *p-n* переходов показывают, что обратный ток пропорционален $U^{1/N}$, где $N=2{,}3$. Это близко к теоретическому значению $N=2$, а несоответствие обусловливается нерезкостью границ *p-n* перехода, а также влиянием поверхностных утечек.

Величины обратных токов ФД на основе высокоомного кремния при напряжении 10 В составляют 10^{-9}—10^{-7} А; для лучших образцов фотодиодов с *p-i-n* структурой — не менее 10^{-10} А при комнатной температуре и величине обратного смещения 40 В. С повышением температуры величина обратного тока увеличивается. При температуре +60°С наблюдается увеличение темнового тока на один-два порядка по сравнению с его значением при комнатной температуре.

ПОРОГ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ШУМЫ

Порогом чувствительности фотоприемника называют минимальную величину светового сигнала, который может быть зарегистрирован ФП с заданной точностью. Чем меньше этот сигнал, тем выше порог чувствительности.

В условиях постоянной немодулированной засветки ФП основным фактором, ограничивающим порог чувствительности, является величина обратного темнового тока, так как при малых световых потоках величина фототока может оказаться сравнимой или меньшей величины темнового тока. Влияние темнового тока можно исключить модуляцией светового потока с последующим усилением переменного фототока, снимаемого с выхода ФП. Когда влияние темнового тока исключено, основным фактором, ограничивающим возможность регистрации слабых световых потоков, являются флуктуационные помехи или шумы ФП и регистрирующей схемы. Шумы ФП подразделяются на внешние и внутренние. Внешние шумы возникают за счет различных наводок и могут быть устранены. В отличие от них внутренние шумы всегда присущи каждому ФП. Природа внутренних шумов обусловлена корпускулярной природой света и электричества и связана с флуктуацией элементарных дискретных частиц (фотонов, электронов), образующих поток света или электрический ток. Для модулированного светового потока порогом чувствительности называется величина мощности излучения, при которой фотоответ равен величине шума.

Основными видами собственных шумов ФП являются тепловой шум, дробовой и избыточный, обратно пропорциональный частоте модуляции f, типа $1/f$. Обычно источники шума представляют в виде эквивалентных генераторов э. д. с. или эквивалентных генераторов тока. Эквивалентный генератор э. д. с., представляющий среднеквадратичное значение э. д. с. $\sqrt{\overline{e^2}}$, рассматривают обычно включенным последовательно с ФП как шумовую э. д. с. холостого хода. Эквивалентный генератор тока $\sqrt{\overline{i^2}}$ обычно рассматривают включенным параллельно ФП как шумовой ток короткого замыкания. Обе эти величины обычно относят к единице полосы частот пропускания, так как амплитуда шумового напряжения или тока может зависеть от частоты, на которой измеряется шум. Тепловой

шум ФП можно определить по формуле для эквивалентного шумового тока

$$\overline{i^2}_{шт} = 4kTg_0\Delta f, \tag{18}$$

где g_0 — активная часть проводимости, не зависящая от частоты; Δf — полоса пропускания.

Тепловой шум имеет место в ФП даже в условиях отсутствия тока через прибор, так как природа этого шума обусловлена хаотичным движением носителей заряда внутри объема прибора. Этот шум не зависит от частоты («белый» шум).

Дробовой (или генерационно-рекомбинационный) шум ФП появляется при протекании тока через прибор и обусловлен флуктуациями потока носителей заряда через p-n переход. Он так же, как и тепловой, не зависит от частоты и является «белым» шумом.

В области низких и средних частот (0,01—10^3 Гц) наблюдается резкое увеличение шума. Увеличение шума происходит по закону $1/f^n$, где $n \approx 1$. Этот шум называется избыточным. Известно, что шум типа $1/f$ слабо зависит от температуры, возрастает после пластической деформации, зависит от состояния поверхности и технологии изготовления полупроводникового прибора. Влажная атмосфера может увеличить шум на несколько порядков. На величину избыточного шума оказывает влияние также плохое качество контактов прибора.

Если учитывать только дробовой шум, то пороговую чувствительность ФП можно записать в виде

$$P = \frac{\sqrt{\overline{i}_{ш.др}}}{S} = \frac{\sqrt{2q\,(I_т + I_ф)\,\Delta f}}{S}, \tag{19}$$

где $I_т$ — темновой ток; $I_ф$ — фототок, создаваемый в результате фонового излучения; $S = I_ф/E$ — чувствительность (интегральная или монохроматическая).

Для лучших ФП, выпускаемых в настоящее время, преобладающим является дробовой шум. Для снижения порога чувствительности необходимо уменьшать темновые токи и увеличивать чувствительность ФП. Снижением темновых токов пороговая чувствительность для кремниевых ФП уменьшена до $(10^{-13} \div 10^{-14})$ Вт/Гц$^{1/2}$ при длине волны света $\lambda = 0{,}8 \div 0{,}9$ мкм и для германиевых до 10^{-12} Вт/Гц$^{1/2}$ при $\lambda = 1{,}55$ мкм. Для ряда ФП не наблюдается корреляции между величинами шума и темнового тока, что вызвано, по-видимому, появлением избыточного шума из-за несовершенства технологии или других факторов.

Порог чувствительности ФП в схеме возрастает за счет шумов нагрузки и предусилителя. Для реализации низких собственных порогов чувствительности ФП необходимо применять предусилители с очень большими входными сопротивлениями (5—50 МОм), что, однако, ухудшает частотные свойства приборов. Поэтому на практике используют значительно меньшие сопротивления нагрузки.

ИМПУЛЬСНАЯ И ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Импульсная характеристика представляет собой зависимость выходного сигнала ФП от времени при освещении его прямоугольным световым импульсом. По импульсным характеристикам определяют два параметра, характеризующие инерционность приборов:

время нарастания и спада сигнала на уровне 0,1—0,9. Форма импульса выходного сигнала и время нарастания и спада зависят от типа излучения, механизма переноса созданных светом носителей, режима работы ФП и сопротивления нагрузки. Импульсный режим работы реализуется в схемах и устройствах, где фотоприемник воспринимает импульсы излучения.

При воздействии на ФП с *p-n* структурой прямоугольного импульса света от GaAs светодиода с максимумом излучения $\lambda = 0,91$ мкм на выходе ФП наблюдают два участка, характеризующие высокочастотный и низкочастотный механизмы формирования импульса. Излучение с длиной волны $\lambda = 0,91$ мкм генерирует носители как в области объемного заряда, так и в области коллектора, а процессы переноса носителей в этих областях различны. Участок быстрого роста сигнала, характеризующий высокочастотную часть импульса, определяется временем пролета носителей в области объемного заряда. Низкочастотный участок вызван диффузионными процессами в коллекторе ФП. В фотовольтаическом режиме работы область объемного заряда мала, все излучение поглощается в коллекторе и времена нарастания и спада сигнала, определяемые диф-

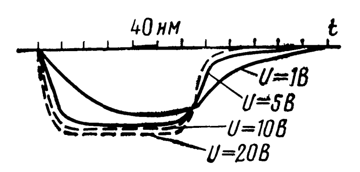


Рис. 15. Форма импульса выходного сигнала ФП с *p-i-n* структурой в зависимости от величины обратного смещения.

фузией, довольно велики (300—500 нс для ФП на основе высокоомного Si, размер фоточувствительной площадки 5 мм²).

В фотодиодном режиме работы с увеличением напряжения обратного смещения увеличивается доля носителей, генерируемых в области объемного заряда. Дрейфовые процессы переноса носителей преобладают над диффузионными, и времена нарастания и спада сигнала на выходе ФП уменьшаются (40 нс для ФП на основе высокоомного кремния при $U_{см} = 20$ В). Для ФП с *p-i-n* структурой на основе высокоомного кремния эти параметры не превышают 20 нс [29]. Толщина *i*-области этих приборов составляет 20—50 мкм, размеры фоточувствительной площадки $1,2 \times 1,2$ мм, спектральная чувствительность в максимуме при обратном смещении 5В равна 300—400 мА/Вт. При малых величинах обратного смещения на *p-i-n* фотодиодах времена нарастания и спада довольно велики (150—200 нс) (рис. 15). Причиной этого могут служить диффузионные процессы в высокоомной *i*-области, так как электрическое поле распространяется не на всю *i*-область, а также влияние *RC*-параметров прибора. С увеличением обратного смещения времена нарастания и спада достигают 30 нс и перестают изменяться. С учетом постоянной времени используемой аппаратуры времена нарастания и спада ФД с *p-i-n* структурой не ниже 20 нс. Для некоторых типов современных кремниевых ФД с *p-i-n* структурой эти параметры не превышают 1 нс.

Несмотря на сравнительно низкую полосу пропускания рассмотренных ФП с *p-n* структурой, следует отметить некоторые их преимущества по сравнению с *p-i-n* структурами. Это, во-первых, их более высокая чувствительность, достигающая в фотовольтаиче-

ском режиме при λ=0,91 мкм величины 400—500, а фотодиодном — 500—600 мА/Вт; а во-вторых, большая фоточувствительная площадка (5—100 мм²) Отмеченные параметры дают возможность использовать их, когда требуются высокая чувствительность и большая фоточувствительная площадка.

Частотная характеристика ФП представляет собой зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты при синусоидально модулированном световом сигнале на входе. Так же, как и импульс-

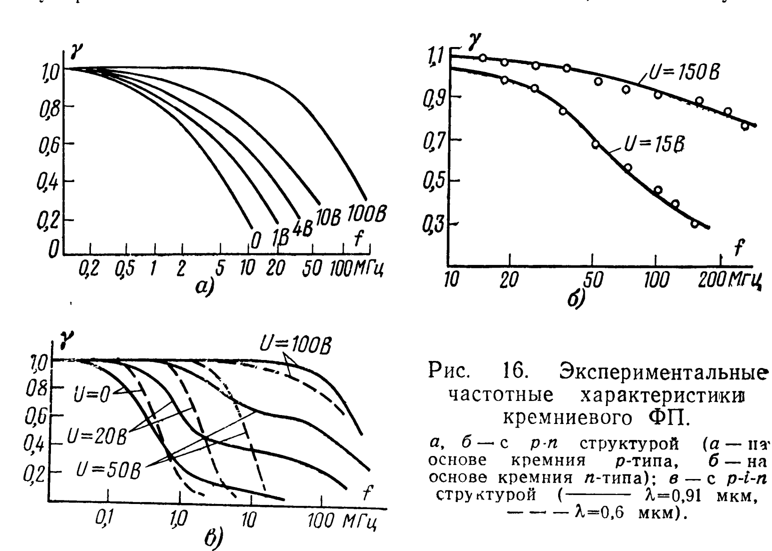


Рис. 16. Экспериментальные частотные характеристики кремниевого ФП.

а, б — с *p-n* структурой (*а* — на основе кремния *p*-типа, *б* — на основе кремния *n*-типа); *в* — с *p-i-n* структурой (——— λ=0,91 мкм, — — — λ=0,6 мкм).

ная, она служит для оценки инерционности приборов По частотным характеристикам определяют критическую частоту ФП, когда амплитуда выходного сигнала составляет 0,7 от ее значения при постоянной засветке. Форма частотной характеристики и критическая частота определяются структурой и параметрами ФП, режимом его работы, а также параметрами источника модулированного излучения (спектральным составом и равномерностью распределения по фоточувствительной площадке). Например, для ФП на основе высокоомного кремния p-типа наблюдается линейная зависимость критической частоты от величины обратного смещения. В качестве источника модулированного света использовался GaAs светодиод с максимумом излучения при λ=0,91 мкм, работающий в люминесцентном режиме. В фотовольтаическом режиме критические частоты таких ФП составляют 1—2 МГц (рис. 16,*а*), а в фотодиодном доходят до 200 МГц при обратном смещении 150 В (рис. 16,*б*).

Критические частоты можно повысить, применяя для ФП *p-i-n* структуры на основе высокоомного кремния. Подобные структуры [30] изготовлялись из высокоомного кремния (ρ=1000÷2000 Ом·см) с толщиной области, равной 60 мкм, и диаметром светочувствительной площадки 1 мм. Критическая частота и форма частотной характеристики этих приборов определяются глубиной проникновения излучения и напряжением обратного смещения.

В фотовольтаическом режиме при освещении прибора светом с $\lambda=0{,}63$ мкм поглощение происходит в очень тонком, прилегающем к поверхности слое и процессы переноса, а следовательно, и критическая частота определяются диффузией носителей ($f_{\text{крит}} = 0{,}4$ МГц) (рис. 16,*в*, пунктирные кривые). С увеличением напряжения область объемного заряда расширяется на весь высокоомный слой, процессы переноса определяются дрейфом и критическая частота достигает 170 МГц при смещении 100 В. При облучении приборов потоком с длиной волны $\lambda=0{,}91$ мкм (рис. 16,*в*, сплошные кривые) характер изменения частотных кривых в функции напряжения такой же, как и для излучения с $\lambda=0{,}63$ мкм, но форма частотных кривых отличается Частотная характеристика для этого случая состоит из двух участков: низкочастотного, обусловленного движением носителей, генерированных за пределами *p-n* перехода, и высокочастотного, обусловленного процессом дрейфа носителей в области объемного заряда. С увеличением обратного смещения область объемного заряда распространяется на весь *i*-слой, процессы переноса носителей определяются дрейфом, низкочастотный участок кривой исчезает. Следует отметить, что преимущества высокочастотных свойств ФП с подобной структурой реализуются только при больших величинах обратного смещения (примерно 100 В), в то время как при небольших смещениях (менее 20 В) критические частоты не превышают 10 МГц.

Для ФД точечного типа (германиевые и кремниевые) критические частоты достигают нескольких ГГц.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ «ФОТОВОЛЬТ»

Высоковольтный фотопреобразователь (ФЭП) «Фотовольт» [31] представляет собой малогабаритную фотобатарею, скоммутированную из микрофотопреобразователей *1* с П-образным *p-n* переходом (рис. 17). Для получения максимальной эффективности ширина

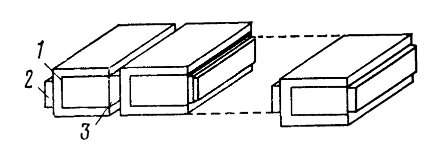


Рис. 17. Схематическое изображение генератора «Фотовольт».

1 — *p-n* переход; *2* — металлический контакт к полупроводнику *n*-типа; *3* — металлический контакт к полупроводнику *p*-типа.

р-области должна быть соизмеримой с диффузионной длиной неосновных носителей тока. Контакты *2* и *3* у микрофотопреобразователей расположены на боковых гранях и занимают на рабочей поверхности матрицы около 5% площади Лучистый поток в отличие от ранее рассмотренных приборов падает параллельно *p-n* переходу.

Количество скоммутированных элементов в зависимости от назначения может колебаться от единиц до нескольких сотен и более. Площадь «Фотовольта», скоммутированного из 250 микрофотопреобразователей, равна 1 см², а из 750 фотопреобразователей— 3 см².

На рис. 18,*а* показана вольт-амперная характеристика матричного ФЭП площадью 3 см², содержащего 750 микрофотопреобразователей, измеренная при засветке вольфрамовой лампой накаливания с цветовой температурой 2850 К. Эксперименты показали, что при

плотности излучения до 10 кВт/м² «Фотовольты» имеют линейную зависимость тока и мощности от освещенности (рис. 18,*б*) при температуре 15—20 °С.

Спектральная характеристика «Фотовольта» представлена на рис. 18,*в*. Ее максимум соответствует длине волны 1050 нм. Спад в коротковолновой области вызван потерями на поверхностную рекомбинацию, а в длинноволновой части — объемной рекомбинацией и прозрачностью материала.

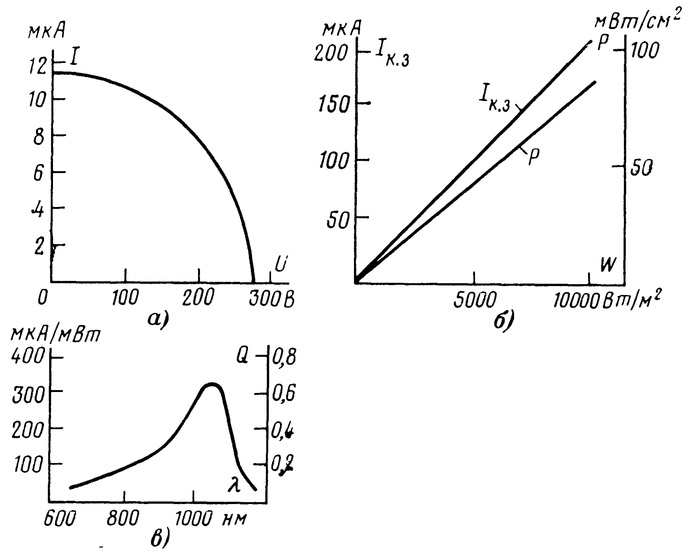


Рис. 18. Характеристики высоковольтного ФЭП, состоящего из 750 микроэлементов.

а — вольт-амперная характеристика; *б* — зависимость тока короткого замыкания и мощности от лучистого потока; *в* — спектральная характеристика.

У хорошо сконструированных и изготовленных приборов при облучении монохроматическим светом с λ≅1000 нм к. п. д. может достигнуть 40%.

Высокие напряжения, которые могут быть получены с малых светочувствительных площадей с искусственными источниками лучистой энергии, позволяют использовать «Фотовольты» для питания высоковольтной аппаратуры, например в электронно-оптических преобразователях, электростатических ускорителях и т. п.

«Фотовольт» позволяет при высоких нагрузках работать в области вольт-амперной характеристики, близкой к току короткого замыкания, обеспечивая при этом высокие значения напряжения. Ток «Фотовольтов» линейно зависит от освещенности в диапазоне 0,1—100 Вт/см². Сохранение линейности этой характеристики в широком диапазоне мощностей излучения дает возможность использовать их в измерителях энергии высокоинтенсивных лучистых потоков.

Отечественной промышленностью разработаны «Фотовольты», предназначенные для питания радио и дозиметрической аппаратуры (на напряжение 10—250 В) и бытовых приборов.

ФОТОПРИЕМНИК КАК ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ

В последние годы в радиоэлектронных устройствах применяют полупроводниковые фоточувствительные емкости — фотоварикапы (ФВ), позволяющие совместить в одном приборе преобразование энергии в электрический сигнал и параметрическое усиление этого сигнала [32].

В основе работы ФВ лежит изменение емкости *p-n* перехода под действием лучистого потока. Это изменение емкости будет таким же, как и при воздействии на *p-n* переход внешнего напряжения, равного фото-э. д. с., генерируемого ФВ под действием лучистого потока.

Усиление фототока с использованием ФВ состоит в том, что последний включают в одно из плеч моста параметрического усилителя. Изменение емкости на *p-n* переходе под действием изменяющегося излучения приводит к появлению сигнала на выходе параметрического усилителя.

В широком диапазоне частот ФЭП имеет высокую добротность емкости и поэтому может использоваться как ФВ.

У ФЭП в силу резкого *p-n* перехода наблюдается высокая нелинейность зависимости их емкости от приложенного напряжения.

Зависимость емкости ФВ от постоянного напряжения $C(U)$ определяется выражением

$$\frac{C(U)}{C(0)} = \sqrt{\frac{U_к}{U + U_к}}, \qquad (20)$$

где $U_к$ — высота потенциального барьера между областями *p* и *n* при отсутствии внешнего напряжения.

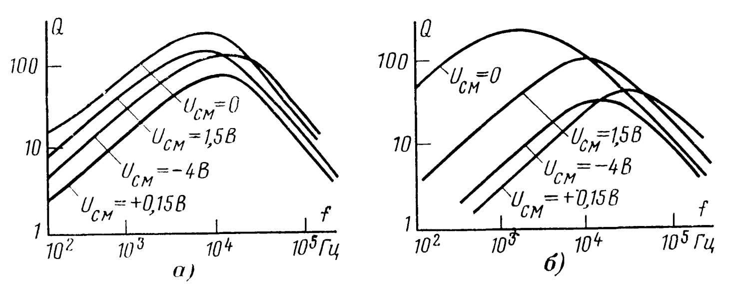


Рис. 19. Частотная зависимость добротности фотоварикапов.
***а* — для кремниевых приборов; *б* — для приборов из арсенида галлия.**

На рис. 19 приведены зависимости добротности кремниевых и арсенидных ФВ от частоты при различных смещениях. Из графиков видно, что ФВ могут работать в диапазоне звуковых и ультразвуковых частот. Емкость на единицу площади при отсутствии внешне-

го напряжения $C(0)$ для кремниевых ФЭП составляет примерно 0,027—0,030 мкФ/см^3, а для ФВ из GaAs—0,038—0,50 мкФ/см^2.

Коэффициент светочувствительности ФВ, характеризующий относительное изменение емкости на единицу светового потока W, для кремниевых приборов составляет 5,7 1/мВт, а для арсенид галлиевых — 240 1/мВт. В фотодиодном режиме коэффициент чувствительности значительно меньше, чем в фотовольтаическом. Температурный коэффициент емкости в фотовольтаическом режиме работы составляет примерно $1{,}5\cdot10^{-3}$ и $0{,}8\cdot10^{-3}$ 1/°C соответственно для фотоварикапов из Si и GaAs.

КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ

Приборы, выходной сигнал которых зависит от местоположения облученного участка, называются **координатно-чувствительными**. Подобные ФП могут работать на основе продольного либо поперечного [33] фотоэффекта.

Фотоприемник, работающий на основе продольного фотоэффекта (рис. 20). При локальном освещении разделенные *p-n* переходом,

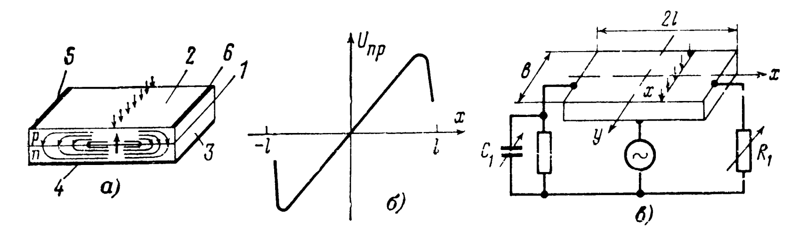


Рис. 20. Координатно-чувствительный ФП, работающий на основе продольного фотоэффекта.

а — конструкция ФП и схематическое пояснение продольного фотоэффекта: *1* — *p-n* переход, *2* — высокоомная фоточувствительная поверхность, *3* — низкоомная область, *4* — нижний сплошной контакт, *5*, *6* — верхние контакты для съема сигнала; *б* — координатная характеристика прибора; *в* — схема ФП с модуляцией.

генерированные в области светового пятна носители, растекаются вдоль легированного и исходного слоя, создавая наряду с поперечным фотонапряжением также и продольное напряжение. Измеряя продольное напряжение между двумя омическими контактами, расположенными на одной из сторон *p-n* перехода, можно по его амплитуде и полярности судить о координате светового пятна.

Продольное фотонапряжение (в случае малых сигналов) определяется зависимостью

$$U_{пр}=I_ф R_н f[x, (\alpha l)], \qquad (21)$$

где $I_ф$ — фототок; $R_н$ — сопротивление внешней нагрузки; x — координата светового пятна; $2l$ — расстояние между контактами.

Уравнение линейно при значениях

$$I_ф \leqslant \left(\frac{AkT}{q}\right)\left(\frac{w}{\rho}\right),$$

но $I_ф > I_0$ (критерий малого сигнала).

В случае большого сигнала

$$I_ф > \left(\frac{AkT}{q}\right)\left(\frac{w}{\rho}\right)$$

линейность продольного фотонапряжения нарушается. Параметр α, характеризующий отношение продольного сопротивления базы фотоэлемента к динамическому сопротивлению *p-n* перехода на единицу длины при нулевом смещении, называется параметром продольного падения и характеризует крутизну продольной характеристики. При наличии малой и равномерной фоновой засветки αl определяется из выражения

$$\alpha l = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_{пр}}{R_{поп}}}, \qquad (22)$$

где

$$R_{пр} = \rho\frac{2l}{bw}; \quad R_{поп} = \frac{AkT}{qI_0}.$$

При этом $R_{пр}$ и $R_{поп}$ — соответственно продольное и поперечное сопротивление прибора; I_0 — темновой ток насыщения перехода; b — ширина ФП; ρ, w — соответственно удельное сопротивление и толщина слоя, с которого снимается сигнал.

Одним из основных требований, предъявляемых к координатно-чувствительным приборам, является линейность зависимости фотонапряжения от перемещения светового пятна по его поверхности (рис. 20,*б*). Крутизна этой прямой при заданном уровне энергетической освещенности определяет чувствительность прибора, которая согласно выражению (21) возрастает для данного l при увеличении удельного сопротивления материала и уменьшении толщины области, с которой снимается выходное напряжение. Однако величина чувствительности имеет предел, превышение которого повлечет за собой нарушение линейности фотонапряжения.

Линейность выходной характеристики продольных ФП определяется отношением отклонения от линейного участка к максимальному сигналу в данной точке и выражается в процентах. Произведение αl для приборов размером 8 × 12 мм в зависимости от удельного сопротивления исходного кремния лежит в пределах 0,1—1,0.

Прибор с продольным фотоэффектом должен удовлетворять также требованиям обычного ФП, т. е. наиболее полно использовать падающую лучистую энергию. Для этого необходимо увеличить коэффициент собирания электронно-дырочных пар, сведя к минимуму потери на отражение, неактивное поглощение, рекомбинацию на поверхности и в объеме.

Изменение чувствительности с увеличением продольного сопротивления и с увеличением мощности излучения линейно. При малых энергетических освещенностях и сравнительно невысоких $R_{поп}$ поперечная фото-э. д. с. при перемещении светового пятна по поверхности прибора с величиной $2l = 12$ мм не изменяется, что свидетельствует о возможности увеличения размеров прибора, не опасаясь нарушения линейности характеристики (рис. 21, кривые *1* и *2*). При высоком продольном сопротивлении (100—300 кОм) наблюдается значительное изменение поперечного напряжения при перемещении светового пятна между контактами (рис. 21, кривые *3* и *4*). Продольная характеристика таких элементов в указанном интервале освещенности продолжает оставаться линейной в пределах 5%. Чув-

ствительность приборов с продольным фотоэффектом может достигать 1000—1500 мВ/(мВт·мм).

Если к контактам, с которых снимается выходное напряжение, приложить дополнительное напряжение, кривая чувствительности в зависимости от его полярности может быть смещена в ту или иную сторону. Зависимость между смещением и приложенным напряжением линейная.

Разновидностью электрического смещения является электронная модуляция, т. е. получение переменного сигнала на выходе при постоянном облучении за счет переменного сигнала, подаваемого на *p-n* переход. Модуляция возможна, так как смещение перехода в прямом направлении уменьшает продольную чувствительность прибора. Вследствие модуляции напряжение продольного фотоэффекта, характеризующее положение пятна излучения, оказывается переменным и его значительно легче усилить, чем напряжение постоянного тока.

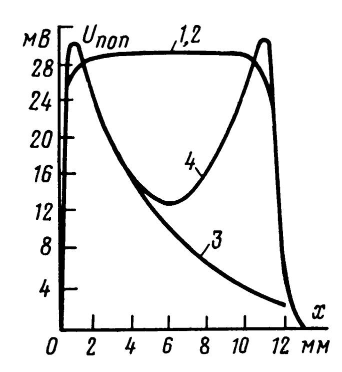


Рис. 21. Изменение поперечного напряжения вдоль прибора.

1, 2 — $R_{пр}$=10 кОм (для прибора с одним и двумя верхними контактами соответственно); *3, 4* — $R_{пр}$=250 кОм (для прибора с одним и двумя верхними контактами соответственно).

Для получения чистого модулированного сигнала на выходе необходимо добиться равенства нулю напряжения, снимаемого с рабочих контактов, при положении светового пятна посредине между контактами. Для выполнения этого требования достаточно поместить один модуляционный контакт точно посредине элемента. Но технологически это весьма затруднительно. Поэтому целесообразно применить схему с двумя модуляционными контактами по обе стороны от оси прибора с компенсацией напряжения модуляции подбором напряжения на модуляционных контактах (рис. 20,*в*). В качестве модуляционных можно использовать рабочие контакты.

Изменение продольного модулированного фотонапряжения при перемещении лучистого пятна между контактами линейно при малых токах модуляции и фототока. Зависимость продольного напряжения от тока модуляции линейна при малых токах модуляции. При больших токах модуляции линейность нарушается. Значение продольного напряжения при различных значениях фототока линейна в области небольших $I_ф$ (ток модуляции $I_м$ составит 3 мкА).

Чувствительность ФП с модуляцией по напряжению холостого хода пропорциональна квадрату сопротивления рабочего слоя ФП.

Важным параметром прибора является мощность шума, который определяется его тепловым сопротивлением. Для кремниевого ФП эквивалентная мощность шума составляет $5 \cdot 10^{-10}$ Вт для полосы 5 Гц, температуры 25 °С, если световое пятно находится на расстоянии 2,5 мм от центра симметрии прибора. Выходная характеристика приборов с продольным фотоэффектом дрейфует со временем с изменением температуры и энергетической освещенности. При этом происходит дрейф нуля, что особенно нежелательно, если прибор используется для точных измерений.

Возможно изготовление и двухкоординатных приборов, однако линейность характеристики таких приборов значительно хуже.

Приборы с продольным фотоэффектом могут найти различные применения. Интересно их использование в качестве датчиков для определения углового положения источника излучения. Кроме того, эти приборы можно использовать в счетнорешающих устройствах и в качестве измерительных приборов, например для измерения давления, деформации, скорости потока жидкости. Приборы могут также использоваться в качестве преобразователей колебаний в двух координатах.

Интересная возможность использования этих приборов заключается в измерении удельного поверхностного сопротивления легированного слоя. Измеряется разность фотонапряжений между двумя точечными зондами (продольная фото-э. д. с.), расположенными симметрично на поверхности прямоугольного образца в зависи-

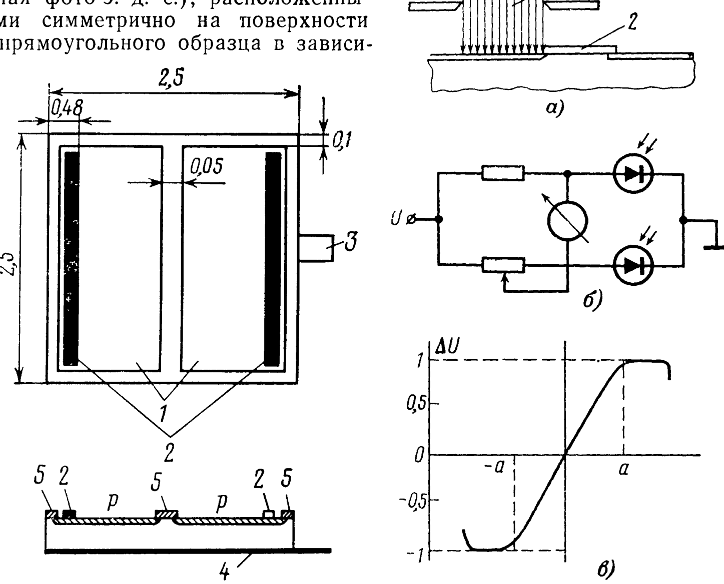


Рис. 22. Устройство дифференциального ФП типа ВРY-48.

1 — фоточувствительная поверхность; *2* — контакты для съема сигнала; *3* — токоотвод тыльного контакта; *4* — нижний сплошной контакт; *5* — окисный слой (SiO_2), закрывающий выход *n-p* перехода.

Рис. 23. Засветка и включение дифференциального ФП.

а — схема засветки: *1* — световой зонд шириной *2а*, *2* — промежуточная не фоточувствительная область, Δx — смещение светового зонда; *б* — схема включения; *в* — координатная характеристика.

мости от положения узкой облучаемой зоны. По наклону и виду полученной при этом зависимости можно судить о величине удельного поверхностного сопротивления и его изменении вдоль поверхности образца.

Координатно-чувствительные фотоприемники, работающие на поперечном фотоэффекте. Такие приборы называются дифференциальными или бифотоэлементами.

Устройство такого ФП типа BPY-48 производства фирмы Сименс [34] представлено на рис 22 На общей монокристаллической подложке близко один к другому (промежуток равен 50 мкм) расположены два ФП, изготовленные по планарной технологии.

Схема засветки, измерительная схема для регистрации сигнала и вид позиционной характеристики представлены на рис 23. Если световой зонд расположен строго посередине между ФП, сигнал равен нулю. При перемещении светового зонда вправо или влево сигнал изменяется линейно, достигая области насыщения. При освещении световым зондом двух элементов (зонд шире промежутка между элементами) результирующее фотонапряжение будет равно разности фотонапряжений каждого из элементов.

При облучении одного из ФП дифференциального элемента лампой накаливания с цветовой температурой 2 850 К, его интегральная чувствительность превышает 15 нА/лк. Она слабо зависит от приложенного обратного напряжения. Различие в чувствительности обеих площадок не превышает 3%.

Таблица 2

Параметр	Значение
Запорное напряжение, В	10
Чувствительность при цветовой температуре излучателя $T_{цв} = 2850$ К, мкА/лк	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Темновой ток, мкА	0,1
Максимум чувствительности при длине волны, нм	850
Нарастание фототока на уровне 0,1—0,9* при $R_н = 1$ кОм; $U_{см} = -10$ В, нс	500
Граничная частота при $R_н = 1$ кОм; $U_{см} = -10$ В, МГц	1
Емкость *p-n* перехода, пФ:	
при $U_{см} = 0$ В	30
при $U_{см} = -10$ В	6
Светочувствительная поверхность, мм²	1,9

* Измерено с GaAs светодиодом.

Дифференциальный элемент изготовляют из высокоомного кремния, благодаря чему емкость переходов, входящих в него ФП, очень мала. Наименьшие значения емкости достигаются при напряжении смещения 5—10 В.

В табл. 2 приведены основные фотоэлектрические параметры дифференциального элемента типа BPY-48 при температуре 25 °С.

Так же, как и в случае элемента с продольным фотоэффектом, на характеристику дифференциального элемента влияют фоновая засветка и повышение температуры. Значительно уменьшить влияние температуры и фона можно с помощью мостовых схем включения прибора в фотодиодном режиме [8].

При дрейфе нулевой точки последняя сдвигается в сторону ФП с меньшей чувствительностью и большим темновым током. Причиной дрейфа нулевой точки является неоднородное изменение параметров

приборов во времени и при изменении температуры, например изменение темновых токов обоих ФП. Дифференциальные ФП целесообразно применять, когда диапазон перемещений светового пятна мал и не превосходит размеров светового пятна или в случае системы «да — нет» с механической отработкой сигнала на ноль [8].

ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ

Поверхностно-барьерные ФП получаются за счет создания потенциального барьера непосредственно на поверхности полупроводника. Барьер может быть создан либо нанесением такого металла, чтобы из-за разности работ выхода металл — полупроводник в полупроводнике получился слой, обедненный носителями заряда (барьер Шоттки), либо за счет специальной обработки поверхности, в результате которой поверхностный слой в отличие от объема полупроводника приобретает иной знак проводимости (инверсионный слой). Омический контакт осуществляется посредством нанесения на инверсионный слой тонкого слоя золота. Золото является хорошим проводником в тонких пленках и, кроме того, имея работу выхода выше, чем у кремния и других полупроводников, создает дополнительный изгиб зон, улучшая характеристику инверсионного перехода. Для обеспечения высокой прозрачности толщина золотой пленки не должна превышать 5—10 нм. Ширина области объемного заряда барьера определяется, как уже отмечалось, удельным сопротивлением материала и величиной приложенного к барьеру смещения.

Схематическое изображение поверхностно-барьерного ФП приведено на рис. 24.

Благодаря тому что электрическое поле, разделяющее генерируемые носители, находится вблизи поверхности, поверхностно-барьерные ФП с полупрозрачным металлическим электродом обладают высокой чувствительностью к сильно поглощаемому полупроводником излучению (фиолетовому и ближнему ультрафиолетовому). Все излучение в области длин волн от 0,2 до 0,6 мкм, пропущенное тонкой золотой пленкой по существу поглощается в области объемного заряда, вследствие чего фототок и частотная характеристика для этого спектрального диапазона не зависят от приложенного напряжения Отсутствие термообработки при изготовлении поверхностно-барьерных ФП обеспечивает сохранение высоких значений диффузионных длин неосновных носителей исходного материала, что повышает чувствительность приборов и в более длинноволновой области спектра. Спектральная характеристика приборов не имеет ярко выраженного максимума. Чувствительность остается неизменной в широком интервале длин волн (0,55—1,0 мкм для кремниевого прибора). В коротковолновом (ниже 0,3 мкм) и длинноволновом (свыше 1,05 мкм) участках характеристики чувствительность соответственно выше, чем у диффузионных приборов.

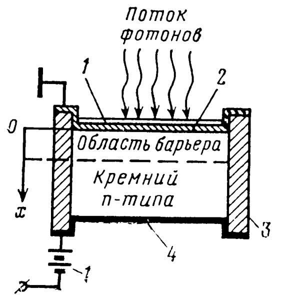


Рис. 24. Схематическое изображение поверхностно-барьерного ФП.

1 — просветляющее покрытие; *2* — тонкая золотая пленка; *3* — изолирующее кольцо; *4* — омический контакт.

Сдвинуть спектральную характеристику кремниевых ФП в длинноволновую область за край собственного поглощения можно, используя приборы с барьером Шоттки. Известны лавинные фотодиоды с барьером Шоттки, чувствительные в ближней инфракрасной области спектра. Диоды на основе кремния и палладия обнаруживают фоточувствительность в диапазоне длин волн 1—2 мкм, а при соответствующем выборе контактирующего металла, типа проводимости кремния и рабочей температуры область чувствительности может быть растянута до 4 мкм. Схематическое устройство фотоприемника и энергетическая схема перехода показаны на рис. 25,*а*, *б*. Фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны кремния, проходят

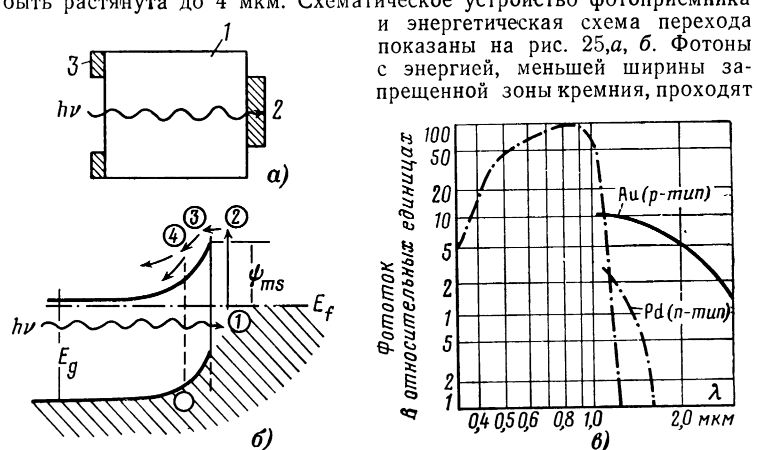


Рис. 25. Лавинные фотоприборы с барьером Шоттки.

а — схематическое устройство: *1* — кремниевая пластина; *2* — слой палладия, в контакте с которым образуется поверхностный барьер; *3* — омический контакт; *б* — энергетическая схема перехода; *в* — расчетные спектральные характеристики.

сквозь пластину *1* и поглощаются в металле *2*, возбуждая в нем горячие электроны. Высота внутреннего барьера Шоттки на границе металл — полупроводник, обозначенная на рисунке через ψ_{ms}, определяется свойствами (работой выхода) металла. Те из возбужденных электронов, которые обладают достаточным импульсом в направлении к барьеру, переходят в примыкающую к границе обедненную основными носителями область пространственного заряда, где осуществляется их лавинное размножение (см. стр. 39). Длинноволновый порог фотоэффекта такого прибора определяется величиной ψ_{ms}, а коротковолновая граница чувствительности — началом собственного поглощения в кремнии. На рис. 25,*в* приведены расчетные спектральные характеристики для двух типов фотодиодов с контактирующим металлом для барьера (золото и палладий); для сравнения там же приведена спектральная характеристика обычного кремниевого фотодиода.

Дополнительно повысить чувствительность прибора можно путем уменьшения отражения света от поверхности золотой пленки. Такой просветленный фотодиод, работающий на основе барьера Шоттки, достаточно подробно описан в литературе. Толщина просветляющей пленки подобрана таким образом, чтобы обеспечить наименьшее от-

ражение излучения с длиной волны $\lambda=0{,}6328$ мкм (излучение гелий-неодимового лазера). Коэффициент собирания прибора в этой области спектра достигает 0,7. Малое значение RC (диаметр прибора 0,25 см^2) позволяло регистрировать световые импульсы наносекундной длительности. Подобные приборы могут изготовляться как в одиночном, так и в матричном исполнении.

На рис. 26 приведена кривая изменения коэффициента собирания для поверхностно-барьерного ФП с барьером Шоттки на основе структуры золото — сульфид цинка n-типа с толщиной пленки золота 0,01 мкм. Эффективность прибора достигает 0,2 для излучения $\lambda=0{,}18$ мкм и 0,5 для $\lambda=0{,}3225$ мкм. Коэффициент собирания поверхностно-барьерного диода золото — арсенид галлия n-типа равен 0,6 при $\lambda=0{,}5$ мкм и 0,25 при $\lambda\approx0{,}2$ мкм [35].

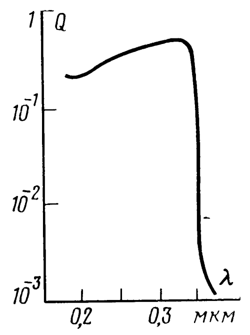


Рис. 26. Коэффициент собирания поверхностно-барьерной структуры золото—сульфид цинка n-типа.

Пороговая чувствительность поверхностно-барьерных приборов определяется шумом самого ФП и связанного с ним предусилителя. В данном случае следует анализировать тепловой шум, дробовый и шум типа $1/f$. Если к ФП приложено высокое обратное смещение, уровень шума на низких частотах определяется шумом $1/f$. При небольших смещениях (примерно 6 В) основную роль играет тепловой шум, обусловленный сопротивлением нагрузки и эквивалентным шумовым сопротивлением предусилителя.

Поверхностно-барьерные ФП могут быть использованы в качестве приемников излучения коротковолновой области солнечного спектра или регистраторов сцинтилляций, где они могут заменить фотоумножители.

ЛАВИННЫЙ ФОТОДИОД

Лавинный ФД относится к классу приборов с внутренним усилением (к этому классу приборов относятся также фототранзисторы и канальные фототранзисторы). Усиление сигнала происходит за счет образования лавинного процесса в области объемного заряда прибора при условии сильного электрического поля в этой области. В области объемного заряда происходит лавинное размножение поступающих туда неосновных носителей — дырок и электронов, которые, приобретая достаточную энергию в сильном поле, сталкиваются с решеткой кристалла и образуют дополнительную электронно-дырочную пару. Дополнительные пары в свою очередь совершают такой же процесс, т. е. происходит размножение. В результате входной ток (I_0) усиливается в M раз, где $M=I/I_0$ — коэффициент умножения. Выражение для коэффициента умножения можно записать с помощью эмпирической формулы

$$M=\frac{I}{I_0}=\frac{1}{1-\left(\frac{U_l}{U_{пр}}\right)^n}, \qquad (23)$$

где $U_{пр}$ — напряжение лавинного пробоя, при котором $M \longrightarrow \infty$; n — показатель, изменяющийся в интервале 2—6; U_i — напряжение, приложенное к области объемного заряда.

С учетом сопротивления прибора и нагрузки выражение для M имеет вид:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U - IR}{U_{пр}} \right)^n}, \qquad (24)$$

где I — ток через прибор; R — суммарное сопротивление прибора и нагрузки.

Коэффициенты умножения темнового и светового тока изменяются по-разному в зависимости от приложенного напряжения. Коэффициент умножения полного тока M увеличивается монотонно с ростом приложенного смещения, в то время как коэффициент умножения светового тока M_p имеет максимум при напряжении пробоя, а при дальнейшем увеличении напряжения коэффициент M_p уменьшается. Максимальный коэффициент умножения светового тока равен:

$$M_{p\,макс} = \sqrt{\frac{U_{пр}}{nRSI_0}}, \qquad (25)$$

где R — последовательное сопротивление фотодиода; S — площадь р-п перехода; I_0 — плотность входного тока.

Величины $M_{p\,макс}$ могут достигать 10^4—10^5 для кремниевых фотодиодов и 10^2—10^3 — для германиевых. Максимальный коэффициент умножения зависит от последовательного сопротивления, фоновой засветки и величины темнового тока. С увеличением последовательного сопротивления $M_{p\,макс}$ уменьшается пропорционально $(RS)^{-1/2}$. Фоновая засветка также снижает коэффициент умножения; при этом чем больше величина темнового тока, тем это влияние сказывается сильнее. Когда плотность темнового тока $I_т$ сравнима с величиной фототока $I_ф$ ($I_ф \approx I_т$), максимальный коэффициент умножения снижается в два раза Для $I_ф \gg I_т$ коэффициент $M_{p\,макс}$ пропорционален $I_ф$.

Зависимость величины темнового тока от температуры и от времени ухудшает температурную и временную стабильность ФД. Указанные выше зависимости справедливы до определенной величины плотности тока, при которой заряд носителей экранирует заряд ионизированных примесей в области объемного заряда и уменьшает поле в этой области. Это приводит к уменьшению коэффициента умножения. Эффект начинает сказываться при больших плотностях тока (10—100 А/мм²).

Основным источником шума лавинных ФД является дробовой шум, зависящий от коэффициента умножения и входного тока:

$$\overline{i^2_ш} = 2qI\Delta f M^x, \qquad (26)$$

где $x = 2 \div 3$.

Таким образом, токовые шумы лавинных ФД увеличиваются более чем в M раз по сравнению с обычными ФД без усиления, в результате чего собственный порог чувствительности ухудшается.

Коэффициент умножения, с одной стороны, увеличивает токовую чувствительность лавинных фотодиодов (ФД) в M раз, с другой — уменьшает критическую частоту. С целью уменьшения влияния M на критическую частоту для кремниевых ФД необходимо работать при $M \leqslant 50$.

Лавинные ФД, обладая такими преимуществами, как высокая чувствительность, малые габариты и малое напряжение питания, имеют и недостатки, ограничивающие их широкое применение. К недостаткам относятся температурная и временная нестабильность, зависимость чувствительности от уровня фоновой засветки, высокие требования к стабильности питающего напряжения, а также технологические ограничения. К последним относится наличие микроплазм (локальных участков в области *p-n* перехода), в которых лавинное размножение происходит раньше, чем в остальной части *p-n* перехода При этом высокий коэффициент умножения ФД практически не реализуется. Для уменьшения количества микроплазм используют различные технологические и конструктивные методы: выбирают материал с однородным распределением примеси и малой плотностью дислокаций; уменьшают площадь *p-n* перехода; используют специальную конструкцию ФД, в которой с целью уменьшения поверхностного пробоя вокруг светочувствительной площадки создается охранное кольцо с глубокой диффузией. Недостатком такой конструкции является дополнительная емкость, вносимая охранным кольцом. В последнее время появились лавинные ФД без охранного кольца, а также приборы со структурой p^+pNN^+, в которых вероятность поверхностного пробоя уменьшена.

СХЕМЫ И УСТРОЙСТВА С ФОТОПРИЕМНИКАМИ

УСТРОЙСТВА СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Фотосчитывание с перфолент и перфокарт. В последние годы в фотосчитывателях с перфолент и перфокарт стали широко применяться кремниевые ФЭП и ФПВ. Они обладают достаточной электрической мощностью, отдаваемой во внешнюю цепь, устойчивостью параметров в широком диапазоне температур и хорошо согласуются с транзисторными усилительными каскадами, выполненными по схеме с общим эмиттером.

Важным параметром при использовании ФЭП в считывающих устройствах является отношение амплитуды полезного сигнала A_c к амплитуде сигнала помехи $A_п$ (фоновому сигналу). При малых сопротивлениях нагрузки (токовый режим) значение $A_c/A_п$ кремниевых ФЭП достигает 5 и резко спадает с увеличением сопротивления нагрузки. Величина отношения $A_c/A_п$ для сигналов напряжения также уменьшается с ростом сопротивления нагрузки, однако пределы этого изменения значительно меньше [36]

Наиболее эффективно ФЭП размером 2×3 и 2×5 мм² (обычно используемые для фотосчитывания с перфолент) работают с нагрузочными сопротивлениями до 500 Ом. В этом диапазоне нагрузок относительные изменения напряжения и тока нагрузки не превышают 20% (в интервале температур $+20 \div +60$°C).

Оптические системы фотосчитывателей обычно не обеспечивают высокой равномерности облучения фотоголовки, состоящей из набора ФЭП, по всей ее поверхности. Различие в интенсивности облучения приводит к разбросу сигналов, снимаемых с отдельных ФЭП кассеты. Неравномерность облучения особенно сказывается при малых сопротивлениях нагрузки. С увеличением сопротивления нагрузки влияние световой неравномерности на величину фотосигнала снижается.

Зависимость тока короткого замыкания $I_{к з}$ от интенсивности света, падающего на кремниевый ФЭП, линейна до интенсивностей $W \approx$

≈ 1500 Вт/м^2. Напряжение холостого хода, начиная с некоторой единичной облученности (принятой равной 550 Вт/м^2), практически перестает расти с повышением интенсивности излучения.

Изменение напряжения на лампе, используемой в качестве источника света, меняет не только величину, но и спектральное распределение излучения, попадающего на ФЭП. В результате линейность зависимости $I_{к\,з} = f(U_{лампы})$ нарушается. Однако изменение спектральной характеристики ламп накаливания (например, типов СЦ-48 и СЦ-61) при изменении напряжения на лампе в пределах 6—7 В сравнительно мало, что позволяет эту зависимость приближенно считать линейной.

В усилительных схемах для устранения тока фоновой засветки на вход транзистора подается смещение, которое может повлечь за собой сильное увеличение токов утечки $I_у$ фотопреобразователей. Этого можно избежать, используя ФЭП с повышенным обратным сопротивлением.

Когда ФЭП в фотосчитывателях работают с обратным смещением, величина $I_у$ выбирается с учетом облученности элементов, степени прозрачности перфоленты и диапазона изменения рабочей температуры. С повышением температуры величина тока утечки возрастает, однако при достижении определенной (фиксированной) температуры его рост прекращается.

Фотопреобразователи, используемые для считываний с перфоленты при работе с диафрагмой диаметром 1,8 мм и облученности 550 Вт/м^2, имеют следующие параметры.

$$U_{х.х} = 500 \text{ мВ};$$

$$\left.\begin{aligned} I_н &\geqslant 500 \text{ мА} \\ U_н &\geqslant 350 \text{ мВ} \end{aligned}\right\} \text{ при } R_н \approx 500 \text{ Ом}.$$

Темновой ток при смещении до —1 В составляет 1÷3 мкА, инерционность — 2 мкс.

Генерируемый кремниевым ФЭП сигнал достаточен для обеспечения работы германиевого транзистора. С кремниевым транзистором необходимо последовательное соединение двух кремниевых ФПВ [37] или подача дополнительного смещения 0,7—1,0 В для превышения порога срабатывания транзистора. Таким дополнительным смещением может стать падение напряжения на диоде, включенном в прямом направлении.

Применение ФЭП в устройствах считывания данных с перфоленты обеспечивает практически неограниченный срок службы этих устройств, позволяет уменьшить необходимое число электронных компонентов на 40% и одновременно увеличить скорость считывания.

К такому виду приборов с большим быстродействием относится разработанный отечественной промышленностью фотосчитыватель типа ФСП-3 [38]. Фотосчитыватель может быть использован для ввода информации в интерполирующие устройства систем цифрового программного управления, электронные вычислительные машины и другие устройства автоматики. В качестве светочувствительных элементов в считывателе используется девять кремниевых ФЭП, расположенных в кассете фотосчитывающей головки. Источником света служит лампа накаливания типа СЦ-48 с номинальным напряжением 8 В и мощностью 30 Вт. Для повышения срока службы на лампу подается напряжение 6 В. Изображение нити накаливания лампы проектируется на отверстия диафрагмы фотосчитывающей головки

полуцилиндрической линзой. Засветка осуществляется через отверстия в диафрагме, имеющие площадь, примерно равную площади отверстий в перфоленте.

Считывание информации, закодированной в виде комбинации отверстий на перфоленте, осуществляется путем последовательного перемещения ленты между осветителем и ФЭП. Каждый элемент считывает информацию, записанную только на одной дорожке. При наличии отверстий на перфоленте ФЭП освещаются и вырабатывают электрические сигналы, которые усиливаются и преобразуются усилителями кодовых дорожек и усилителем ведущей (синхронизирующей) дорожки.

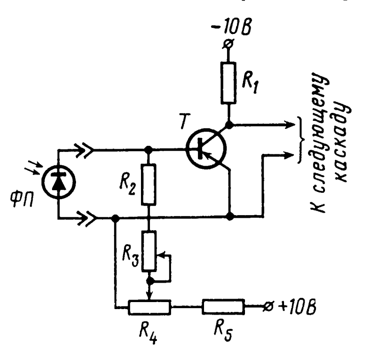


Рис 27 Первый каскад усилителя ведущей и кодовой дорожек.

Девять ФЭП обеспечивают получение восьми выходных сигналов с кодовых дорожек и одного сигнала с дорожки синхронизации и позволяют использовать стандартные пяти- и восьмиканальные перфоленты. Выходы восьми каналов кодовых дорожек стабилизируются сигналом с дорожки синхронизации таким образом, что выходные сигналы появляются одновременно. Лента перемещается асинхронным электродвигателем типа АОЛ-011/4 или АОЛ-011/2 для скоростей ленты 700 и 1400 строк/с соответственно. Первые каскады усилителей ведущей и кодовой дорожек, подключенные к выходам ФЭП, выполнены по схеме рис. 27.

Первый каскад на транзисторе T работает в ключевом режиме. При отсутствии сигнала с ФЭП ключ находится в режиме отсечки. При освещении ФЭП ключ переходит в режим насыщения и напряжение на коллекторе T уменьшается до 0,1 В.

Так как используемая в фотосчитывателе перфолента может иметь достаточно большой коэффициент прозрачности (до 70%), то и при отсутствии пробивки на ней напряжение ФЭП может превышать напряжение отсечки ключа и последний будет находиться в режиме насыщения. Для согласования ФЭП с усилителем при использовании перфоленты различной прозрачности на базу транзистора T через резисторы R_2 и R_3 подается смещение с общего для усилителя ведущей и кодовых дорожек потенциометра R_4.

Изменением сопротивлений резисторов R_3 и R_4 величина смещения устанавливается такой, чтобы при отсутствии пробивки на перфоленте с высоким коэффициентом прозрачности ключ находился в режиме отсечки, а при наличии пробивки — в режиме насыщения.

Сигнал с коллектора T поступает на вход релейного усилителя в канале ведущей дорожки или импульсно-потенциальную схему совпадения в канале кодовой дорожки.

Фотосчитыватели с лампами накаливания достаточно громоздки и потребляют много электроэнергии, нуждаются в собирательной оптике (линзы, световоды). Кроме того, вольфрамовые спирали ламп имеют малый срок службы (5000 ч) и весьма чувствительны к вибрациям.

В последние годы все большее применение находят устройства ввода, использующие в качестве источников излучения светодиоды (СД) из GaAs и в качестве детекторов излучения — кремниевые ФП. Потребляемая источниками головки считывания мощность уменьшается при этом на два — три порядка, отпадает необходимость в оптических системах линз и призм. Подобные головки компактны, надежны в работе и нечувствительны к вибрациям. В головке могут устанавливаться излучатели мощностью 3—6 мВт при токе 100 мА и с диаметром полусферы около 1,5 мм. Кремниевые ФП имеют размеры фоточувствительной площадки (2×3 мм) и крепятся к подложке гибридной схемы усилителя. Чувствительность ФП достигает 500 мкА/мВт при λ=0,91 мкм, что соответствует максимуму излучения узкого спектра используемых излучателей Благодаря такой характеристике излучателей уровень шумов на выходе чувствительных элементов уменьшается.

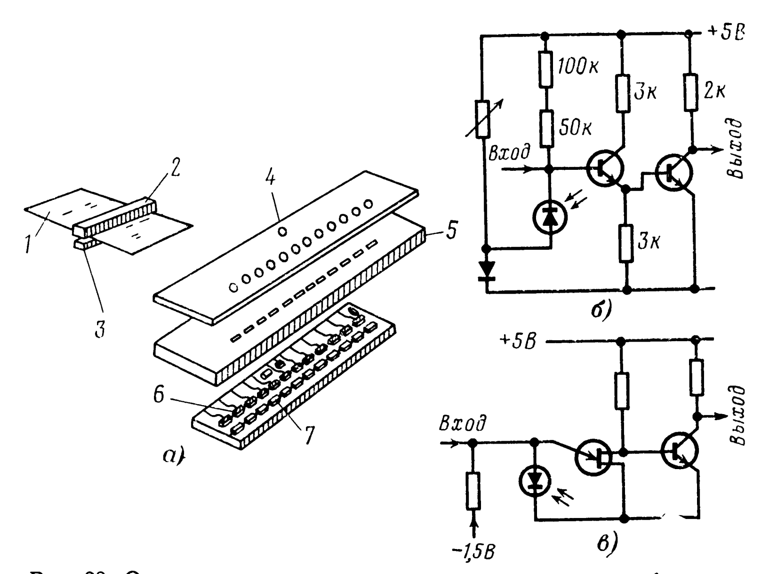


Рис. 28. Оптоэлектронная головка для считывания с перфокарт.

а — схема устройства: *1* — перфокарта, *2* — блок светодиодов, *3* — фотоприемный блок, *4* — диафрагма осветительного блока, *5* — диафрагма фотоприемного блока, *6* — фотопреобразователи, ФЭП, *7* — гибридные усилители; *б, в* — схемы согласования сопротивлений входной и выходной цепей.

При работе ФП в режиме ФПВ устройство работает в диапазоне от сигналов на постоянном токе, до частоты 1,5—2,0 МГц при температуре 80°С. Фотодиодный режим работы позволяет расширить частотный диапазон до нескольких десятков мегагерц.

Схема устройства головки на основе СД и ФЭП в комбинации с гибридными усилителями, предназначенная для считывания с перфокарт, представлена на рис. 28.

Фотоприемники могут быть использованы и в клавишных пультах ввода и вывода информации. В подобных устройствах для счи-

тывания с перфокарт с одной стороны рычагов клавиш установлен ряд миниатюрных лампочек, с другой — ряд ФПВ. В клавишных рычагах снизу имеются кодирующие прорези, определяющие число световых лучей, которые попадают на ФПВ при нажатии определенной клавиши. Выходной сигнал подается непосредственно на операционный усилитель логической схемы.

Фотосчитывание в преобразователях «угол — код». Весьма успешно используются ФПВ в преобразующих устройствах «угол—код».

Характерной особенностью работы ФПВ в датчиках углового положения с цифровым выходом является их засветка через узкую (несколько микрон) щель высокоинтенсивными импульсными лампами. Работа ФПВ в режиме импульсной узкощелевой засветки требует от них малой инерционности (длительность вспышек современных импульсных ламп колеблется от 1,5 до 2,5 мкс) и равномерной чувствительности по всей рабочей поверхности, иначе малейшее смещение светового потока повлечет за собой недопустимое изменение сигнала с выхода фотоприемника. Кроме того, малая площадь засветки требует высокой чувствительности ФПВ.

Примером может служить преобразователь угла поворота вала в цифровой код. Основой прибора является стеклянный диск с циклическим кодом Грея, представленным в виде прозрачных участков концентрических колец, нанесенных на поверхность диска фотоспособом. С одной стороны диска расположен источник света (импульсная лампа), с другой — ряд фотоприемников, на которые падает свет, прошедший через кодовый диск и узкую считывающую щель. Используются в подобных устройствах компактные многоячеечные фотоприемники. Газоразрядная лампа периодически освещает все разрядные кольца диска вдоль его радиуса. Кодирование углового положения вала порнзводится в момент вспышки лампы. Выходные сигналы с ФПВ представляют собой комбинации единичных импульсов (соответствующих прозрачным участкам кодового диска), поступающих далее на вычислительно-преобразовательное устройство. Тринадцатиразрядная система (диаметр 100 мм) делит один оборот вала на 8192, а шестнадцатиразрядная (диаметр диска 250 мм) — на 65 536 дискретных положений.

Максимальная скорость считывания соответствует наибольшей частоте вспышек источника света, при которой еще имеется достаточная интенсивность светового луча, обеспечивающая необходимый сигнал, снимаемый с ФПВ. При длительности вспышки 6 мкс безошибочное считывание обеспечивается при скоростях вращения до 1200 об/мин. При этой скорости за время отсчета перед приемником света проходит не более одной отсчетной единицы (элемента кодового рисунка на крайнем внешнем кольце кодового диска).

В настоящее время вместо импульсных ламп в преобразователях «угол — код» используются СД.

Фотосчитывание с муаровых узоров. Весьма перспективно использование ФПВ и ФЭП при считывании, основанном на эффекте муаровых узоров [13,39]. Основной принцип получения муарового узора основан на сопряжении (перемещении одного относительно другого) двух растров [1]. При перемещении одного растра

---

[1] Растр представляет собой совокупность подобных элементов (полос, колец, радиусов и т. п), образующих периодическую структуру и воздействующих на лучистый поток как единое целое. Примером растра может служить дифракционная решетка.

относительно другого меняется плотность муаровой картины и, следовательно, интенсивность проходящего или отраженного света. **Оптическая схема** для реализации этого принципа (рис. 29,*а*, *б*) **включает блок** осветителя *1*, создающий параллельный пучок света, растровое сопряжение *3*, освещаемое этим пучком, и блок фотоприемников *4*. Перед ФПВ располагается диафрагма. Величина и форма выходного сигнала ФПВ определяются пропусканием (отражением) растрового сопряжения.

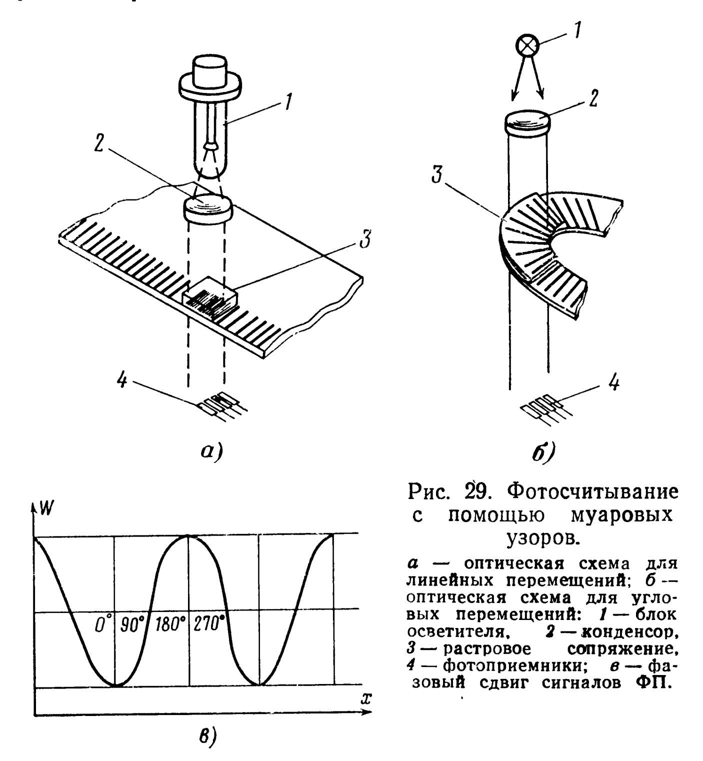


Рис. 29. Фотосчитывание с помощью муаровых узоров.

а — оптическая схема для линейных перемещений; *б* — оптическая схема для угловых перемещений: *1* — блок осветителя, *2* — конденсор, *3* — растровое сопряжение, *4* — фотоприемники; *в* — фазовый сдвиг сигналов ФП.

Растровые системы широко применяются для управления станками, в высокоточной измерительной аппаратуре линейных и угловых перемещений и т. п. В регистрирующей аппаратуре обычно используют четыре ФПВ, что позволяет при соответствующем угле между рисками обеих решеток построить схему, различающую направления движения муаровых полос. На каждый ФПВ поступает световой поток, сдвинутый по пространственной фазе на $\pi/2$ относительно предыдущего фотоприемника (рис. 29,*в*). Для формирования каждого из сдвинутых сигналов ФПВ включают попарно через один, т. е. первый с третьим и второй с четвертым по балансной схеме. При перемещении одной из решеток в одном направлении изменение сигнала, создаваемого парой *1*—*3*, отстает на четверть периода от изменения сигнала пары *2*—*3*, а при перемещении в противоположном

направлении сигнал ФПВ пары *1—3* отстает от сигнала пары *2—3* на ту же четверть периода. Достоинством такого включения ФПВ является автоматическая компенсация дрейфа в уровне постоянной составляющей сигнала от температуры и изменения светового потока.

Соответствующим подбором параметров растрового звена можно добиться практически синусоидальной формы сигналов, снимаемых с каждой пары ФПВ.

При работе с муаровыми узорами выходные сигналы ФПВ должны быть строго пропорциональны освещенности, а коэффициенты пропорциональности у ФПВ, образующих группу в четыре прибора, должны отличаться один от другого весьма незначительно (не более чем на 5%). Кроме того, в широком интервале окружающих температур и освещенностей соотношение между интенсивностью освещения и выходным сигналом должно быть стабильным. Важным требованием является также постоянство отношения выходного сигнала ФПВ к интенсивности освещения даже при изменении нагрузки в широких пределах [39].

Подобные требования могут быть обеспечены при работе ФПВ в режиме генератора тока, причем коэффициент заполнения вольтамперной характеристики $I_{н}U_{н}/I_{к.з}U_{х\,х}$ должен быть достаточно высоким.

Читающие автоматы. Разновидность фотосчитывания, где также могут успешно применяться ФПВ (или ФЭП), основана на регистрации отраженного от поверхности документа светового потока. На таком методе работают читающие автоматы. Информация наносится на бланки в виде графических отметок, кодированных, нормализованных и стилизованных письменных знаков, печатных, машинописных и рукописных знаков.

Считывание может осуществляться посредством, например, десяти ФПВ. Отраженный световой поток попадает на ряд ФПВ, каждый из которых имеет определенный индекс. В процессе осмотра поверхности документа на ФПВ попадает световой поток различной интенсивности. При этом значения отраженного светового потока от кодовой метки и контура знака будут различными, что позволяет с помощью амплитудного селектора произвести определение импульсов кодовых меток от контурных импульсов В результате определяется номер ФПВ, а с ним и значение анализируемого знака.

Миниатюрное фотосчитывающее устройство. Устройство фирмы Хоякава электрик представляет собой одну прямую линейку из 36 миниатюрных кремниевых ФПВ, размещенных на общей подложке длиной 19 мм. Продольный размер каждого элемента составляет около 0,4, а расстояние между центрами соседних элементов — 0,5 мм. Фотоприемники облучаются СД из GaAs. Выпускаются аналогичные приборы, содержащие два ряда по 36 ФПВ, однорядные приборы, насчитывающие 42 или 60 ФПВ, а также двухрядные приборы из 150 ФПВ. В приборах используются СД двух типоразмеров. Более мощные СД имеют выход 100 мкВт при постоянном токе через диод 100 мА. Светодиоды способны выдерживать импульс тока до 15 А в течение 5 мкс. Для улучшения светового выхода они имеют форму полусферы. Менее мощные СД способны выдерживать импульсы тока 2 А длительностью 5 мкс Выходная мощность их 8 мкВт при постоянном токе через прибор 100 мА. Выходной сигнал, считываемый с ФПВ, равен 0,4 В.

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

К оптоэлектронным относятся функциональные электронные устройства, в которых сочетаются два способа обработки и передачи информации — оптический и электрический.

Элементарным звеном оптоэлектроники, выполняющим простейшие функциональные преобразования, является оптрон, включающий в себя источник излучения и фотоприемник, связанные между собой оптической средой. Оптрон представляет собой элементарный четырехполюсник с оптической связью. Между элементами оптронной пары отсутствует электрическая связь, а преобразование входного сигнала в выходной происходит по схеме: электрический сигнал — оптический сигнал — электрический сигнал.

На рис. 30 в качестве примера приведена возможная конструкция оптрона. Излучение полусферического источника *1* (СД) фокусируется параболическим отражателем *2* на поверхности ФП *4*. Пространство между СД и ФП залито прозрачным компаундом *3*. Управление оптроном можно осуществить, изменяя ток и напряжение на светодиоде, фотоприемнике, а также изменяя параметры оптического канала.

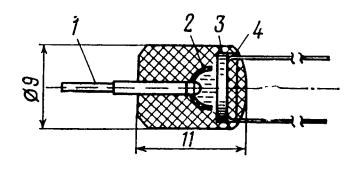


Рис. 30. Конструкция оптрона.

К основным статическим характеристикам оптрона относятся входная, передаточная и выходная. Входной характеристикой оптрона является вольт-амперная характеристика светодиода, передаточной — зависимость фототока от входного тока, а выходной — зависимость фототока от величины приложенного смещения при фиксированном значении входного тока. Практически имеют место семейства выходных и передаточных статических характеристик оптрона. Весьма важными для оптрона являются также динамические характеристики (частотные, импульсные), показатели температурной стабильности и надежности

Возможности применений оптрона достаточно широки [15, 16, 18]. Он может использоваться в качестве элемента гальванической развязки, импульсного модулятора, коммутатора каналов радиорелейных линий, малогабаритного бесконтактного виброустойчивого реле, широкополосного безындуктивного трансформатора, оптоэлектронного усилителя электрических сигналов и др.

Оптическая связь делает оптрон идеальным импульсным трансформатором. С этим связано применение его в оптоэлектронных импульсных усилителях и в цифровых интегральных схемах. Применение оптрона с фотодиодом дает возможность увеличить полосу пропускания схемы по сравнению с оптроном, где в качестве приемника используется фотосопротивление или фототранзистор. Но так как коэффициент усиления элементарного оптрона с фотодиодом меньше 1, это приводит к усложнению схемы из-за дополнительной ступени усиления.

Широкое применение находят также оптроны, у которых наряду с оптической, имеется еще и электрическая связь между источником и приемником излучения. Эти оптроны могут быть использованы в различных схемах автоматики и счетнорешающей техники Одним из примеров использования такого оптрона является нейристор. Нейристор — устройство, действующее подобно нервным волокнам и про-

пускающее импульсы без затухания. Он может использоваться для целей сканирования в вычислительной машине [40]. В нейристоре (рис. 31), изготовленном фирмой Ниппон электрик, каждый каскад состоит из последовательно включенных лазера (*Л*), фотодиода (*ФД*) и фоторезистора (*ФР*), а также подключенного к этой цепочке конденсатора. Чтобы по цепи распространялся импульс, свет от лазера одной ветви направляется на фоторезистор, включенный в цепочку,

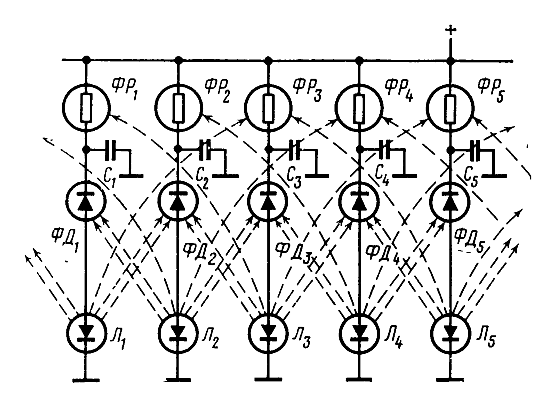


Рис. 31. Схема нейристора.

отстоящую на две ветви дальше по направлению распространения, благодаря чему осуществляется заряд конденсатора. Кроме того, свет от того же лазера переводит в проводящее состояние фотодиод, включенный в соседней ветви. Фотодиод открывается, и срабатывает следующий лазер. Таким образом обеспечивается распространение импульса в устройстве.

Оптоэлектронные системы на полупроводниковых лазерах и фотодиодах, хотя их мощность и мала, могут использоваться в качестве устройств электрической развязки на частотах СВЧ диапазона. Примером может служить устройство, использующее арсенидно-галлиевый лазер и *p-i-n* фотодиод [40]. Произведение усиления на полосу пропускания такого устройства составляет 6,3 ГГц.

Наряду с элементарными оптронами в настоящее время разрабатываются и оптоэлектронные матрицы. Они могут найти широкое применение в устройствах считывания с перфокарт и перфолент. Для постоянных запоминающих устройств с оптическим считыванием была разработана оптоэлектронная матрица, содержащая 1024 пары светодиодов и фотодиодов, смонтированных на печатных платах, полученных методом травления и электрически соединенных в матрицы из 32×32 элементов.

С появлением надежных лазерных источников появилась возможность использовать оптоэлектронные системы с лазером и фотодиодом для целей слежения и определения координаты цели. Преимуществом таких систем является способность измерять координаты на малых высотах.

Интересными возможностями применения обладают оптроны с управляемым оптическим каналом [41]. Управление параметрами

лучистого потока, который является носителем информации в оптроне, позволяет повысить его помехозащищенность по отношению к внутренним шумам. Электрический сигнал на выходе фотоприемника обычно мал и нуждается в усилении. Получение переменного выходного сигнала за счет модуляции светового потока дает возможность применять для усиления хорошо зарекомендовавшие себя усилители переменного тока. Оптрон с управляемым оптическим каналом может выполнять как простейшие логические операции, так и некоторые сложные логические функции. Такой прибор может быть использован для создания устройств ввода информации в ЭЦВМ, построения логики самих ЭЦВМ (оптоэлектронный модулятор, счетчик импульсов и т. д.). Для управления лучистым потоком можно использовать различные модуляторы света. Наиболее перспективными материалами для создания модуляторов, изменяющих интенсивность лучистого потока, являются такие, в которых проявляется эффект Франца — Келдыша — сдвиг края спектральной полосы поглощения под действием сильного электрического поля. Этот эффект проявляется в халькогенидных стеклах, которые особенно интересны, так как обеспечивают хорошие условия светопередачи в оптроне и очень технологичны. Габариты такого модулятора невелики. Для получения 100%-ной глубины модуляции требуются высокие напряженности электрического поля, которые могут быть реально получены, так как управление ведется в тонких слоях материала, обладающего высоким удельным сопротивлением. В качестве модуляторов света могут также использоваться химотронные ячейки и жидкие кристаллы [41].

В качестве примера можно привести параметры оптрона, состоящего из $Ga_xAl_{1-x}As$ светодиода, кремниевого *p-i-n* фотодиода и арсенидно-галлиевого модулятора. Достоинствами используемого модулятора является простота изготовления, возможность микроминиатюризации, высокая эффективность модуляции при сравнительно низких управляющих напряжениях. Максимум модуляции имеет место при длине волны $\lambda=0{,}88$ мкм, полуширина спектральной области модуляции $\Delta\lambda=0{,}008\div0{,}01$ мкм, собственная емкость модулятора 25 пФ.

В качестве светодиода использовалась гетеропереходная структура на основе $Ga_xAl_{1-x}As$, длина волны излучения которого 0,88 мкм, полуширина максимума излучения $\Delta\lambda\approx0{,}045$ мкм, эффективность 1%. Максимум чувствительности фотодиода расположен при $\lambda=0{,}88$ мкм.

Параметры оптрона с GaAs модулятором:

Диапазон рабочих напряжений, В	0—100
Коэффициент передачи сигнала по напряжению	10^{-4}
Коэффициент модуляции при $U_{вх}=100$ В, %	26
Быстродействие при сопротивлении нагрузки 1000 Ом, с	10^{-8}
Коэффициент передачи по току	10^{-1}
Проходная емкость, пФ	3

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛУЧИСТОГО ПОТОКА

Использование ФП (ФПВ и ФЭП) в качестве индикаторов лучистого потока позволяет создать измерители, отличающиеся большой чувствительностью и малой инерционностью.

При необходимости получения линейного индикатора уровня освещенности измерительный прибор (для случая работы его как ФПВ) следует выбирать так, чтобы собственное сопротивление было значительно меньше, чем оптимальное сопротивление нагрузки ФПВ.

Измеряемый ток в этом случае практически представляет собой ток короткого замыкания, который изменяется линейно при изменении уровня освещенности В настоящее время имеются ФПВ, обеспечивающие линейный ход зависимости $I_{к з}(W)$ до энергетической освещенности 10^3 мВт/см^2.

Спектральная характеристика и большой квантовый выход кремниевых ФП позволили успешно использовать их для измерений мощности излучения СД в видимой и ближней инфракрасной областях спектра вплоть до 10^{-8} Вт

На рис. 32 показано устройство, позволяющее измерять общую выходную мощность СД или мощность, заключенную внутри заданного телесного угла. Электрическая схема обеспечивает работу ФПВ в режиме, близком к короткому замыканию, так что его выходной ток $I_{к з}$ будет прямо пропорционален лучистой энергии, падающей на него от СД. Лучистую энергию СД в ваттах можно определить, разделив ток прокалиброванного ФПВ на его чувствительность для данной длины волны. Величина чувствительности определяется по кривой абсолютной спектральной чувствительности ФПВ (см. рис. 9). Улучшение собирания излучаемой СД энергии достигается с помощью отражающих поверхностей При измерении полной мощности излучения СД светочувствительная площадь ФПВ должна быть достаточно большой, чтобы на нее мог попасть весь сформированный пространственно неоднородный поток СД. Для определения величины излучаемой СД мощности в данном телесном угле между ним и ФПВ устанавливают диафрагму.

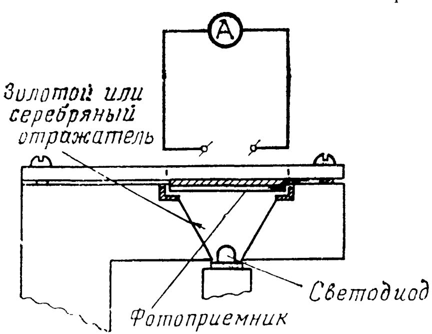


Рис 32. Устройство для измерений общей выходной мощности светодиода.

Благодаря высокой эффективности кремниевые ФП с успехом могут быть использованы в механизмах автоматических затворов кино- и фотокамер. Несоответствие спектральной чувствительности ФП и глаза можно устранить специальными фильтрами, при этом происходит уменьшение (до 50%) выходного сигнала.

В новейших конструкциях фото- и кинокамер установка экспозиции также осуществляется с помощью кремниевых ФП, которые сменили ранее использовавшиеся для этой цели селеновые и сернисто-кадмиевые ФП.

При использовании приборов с неглубоким залеганием p-n перехода (с повышенной чувствительностью в области видимого светового излучения) спектральная характеристика кремниевых ФП мало отличается от характеристики цветной пленки Плавность спектральной характеристики фотопреобразователей позволяет довести ее до полного совпадения с характеристикой цветной пленки при помощи простого оптического светофильтра. Кроме того, кремниевые ФП, в отличие от селеновых и сернистокадмиевых фотоприборов, имеют хорошую временную стабильность и высокое быстродействие. Фото-

приемники, установленные в фото- и кинокамерах фирмы Фудзи Фотофильм К°, имеют размер 3×3 мм при фоточувствительной поверхности 2,6×2,7 мм. Чувствительность ФП линейно уменьшается при каждом двухкратном увеличении освещенности. Приборы обладают повышенным обратным сопротивлением при их полном затенении и работают в электронной схеме с полевыми транзисторами.

Логарифмический закон, требуемый при регулировке уровня освещенности, может быть обеспечен, например, при работе ФП в фотовольтаическом режиме (э. д. с. холостого хода).

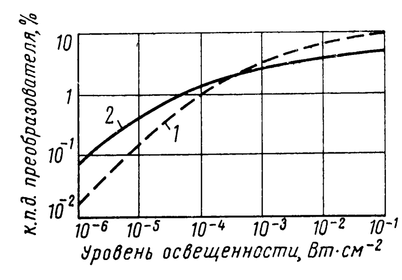


Рис. 33. Эффективность работы ФП при различных уровнях облученности.

Применение светочувствительных элементов с обычной линейной характеристикой не позволяет сконструировать диафрагму с требуемой скоростью уменьшения отверстия, так как генерируемый фототок при большой освещенности окажется недопустимо большим.

С появлением лазерной техники возникла необходимость измерения мощности излучения как одиночных коротких импульсов, так и импульсов с большой частотой следования. Подобные измерения требуют применения малоинерционных ФП. Кроме того, при большой пиковой мощности импульса излучения желательны приборы, обладающие линейностью световой характеристики до возможно больших значений падающей энергии. Это может быть достигнуто уменьшением последовательного сопротивления прибора $R_п$ и увеличением сопротивления запорного слоя R_{p-n}. Так как поток излучения импульсных лазеров может иметь сечение несколько квадратных сантиметров и обладать пространственной неоднородностью, то в данном случае для измерительных целей необходимо иметь ФП с большой фоточувствительной площадкой. Фокусировка же импульсного излучения, помимо технических трудностей, нежелательна еще и потому, что она резко увеличивает освещенность ФП, а это может потребовать дополнительного ослабления излучения и приведет к увеличению погрешности измерения.

При индикации лучистых потоков высокой интенсивности целесообразно использовать ФЭП, обладающие наибольшей эффективностью при образовании высоких уровней облученности — 200 Вт/м² и выше (рис. 33, кривая *1*).

При регистрации очень низких облученностей, что представляет значительный практический интерес, эффективность такого ФЭП мала. Это обусловлено тем, что в очень тонких (несколько десятых долей мкм) переходах, характерных для ФЭП энергетического назначения, имеет место эмиссия за счет внутреннего поля Эмиссия уменьшает эффективное сопротивление перехода и делает ФЭП мало чувствительным к низким освещенностям Приборы, обладающие повышенной чувствительностью к низким облученностям (рис. 33, кривая *2*), лишены этого недостатка. Они имеют увеличенную ширину перехода, эффективное сопротивление которого достаточно велико. Однако это достигается при одновременном увеличении толщины

верхнего легированного слоя, что приводит к некоторому уменьшению коэффициента собирания.

Как уже отмечалось, на чувствительность устройств с ФЭП оказывает влияние режим работы последних. Так, например, в экспонометре на основе кремниевого ФЭП и измерительной схемы, смонтированной на одном кремниевом кристалле [42], в отличие от обычных автоматических экспонометров, где производится измерение напряжения холостого хода ФЭП, на вход измерительной схемы подается ток короткого замыкания ФЭП. Это обеспечивает не только

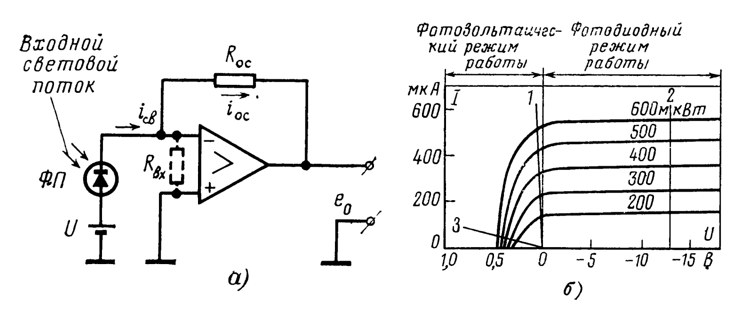


Рис. 34. Светочувствительный датчик.

а — общая схема; *б* — семейство вольт-амперных характеристик ФП: *1* — нагрузочные характеристики при малом сопротивлении нагрузки, *2* — нагрузочные характеристики при смещении — 13 В, *3* — нагрузочные характеристики несмещенного ФП при большом сопротивлении нагрузки.

повышение чувствительности устройства, но и более высокую температурную стабильность. Напряжение на освещенном ФЭП в этом случае практически равно нулю, поэтому наличие тока утечки не приводит к уменьшению чувствительности. При использовании ФЭП с поверхностью 3 мм^2 экспонометр начинает функционировать при минимальной освещенности 0,01 лк, что в 25 раз меньше освещенности, создаваемой Луной.

В [45] приводится описание твердотельного датчика для регистрации очень слабых сигналов. Этот датчик, состоящий из кремниевого ФП большой площади (примерно 1 см^2) и малошумящего усилителя, позволяет обнаруживать световые излучения, создающие облученность 10^{-12} Вт/см^2 в диапазоне длин волн 200—1100 нм.

Эффективность использования малошумящего ФП определяется правильностью выбора операционного усилителя и схемой соединения этих двух элементов датчика. В схеме, представленной на рис. 34,*а*, ФП используется как генератор тока, а операционный усилитель служит преобразователем этого тока в напряжение. Нагрузкой ФП является входное сопротивление операционного усилителя $R_{вх}$, которое при замкнутой цепи обратной связи может быть сделано достаточно малым (обычно меньше 10 Ом). Использование низкоомной нагрузки позволяет увеличить быстродействие ФП, поскольку в этом случае исключается влияние его емкости, которая может достигать в фотовольтаическом режиме 1000 пФ. Фотоприемник работает при такой нагрузке практически в режиме короткого замыкания.

Уменьшение сопротивления нагрузки позволяет также повысить линейность световой характеристики. При малом сопротивлении на-

грузки нагрузочные прямые *1*, *2* рис. 34,*б* находятся в линейной области вольт-амперных характеристик. Если нагрузка ФП, создаваемая входным сопротивлением операционного усилителя, не является низкоомной, то при отсутствии напряжения смещения нагрузочная прямая *3* пересечет нелинейную область вольт-амперных характеристик, соответствующую фотовольтаническому режиму работы ФП.

При большом коэффициенте усиления операционного усилителя с разомкнутой цепью обратной связи ($K \gg 1$) можно считать, что ток в цепи обратной связи равен выходному току $i_{св}$, а напряжение на выходе усилителя $e_0 = i_{св} R_{о\,с}$. В то же время так как $i_{св} = SW$ (где S — интегральная чувствительность ФП, А/Вт, а W — мощность лучистого потока), то $e_0 = SR_{о\,с}W$. При уменьшении энергетической освещенности следует уменьшить сопротивление обратной связи ($R_{о\,с}$) иначе выходное напряжение будет уменьшаться. Важное преимущество пары ФП — операционный усилитель состоит в том, что путем изменения сопротивления обратной связи от 100 Ом до 100 МОм удается с помощью одного простого милливольтметра регистрировать световые потоки в диапазоне от 10^{-11} до 10^{-3} Вт.

Таблица 3

Параметр	Значение
Спектральная чувствительность (на длине волны $\lambda = 850$ нм), А/Вт	0,4
Темновой ток (при смещении —5 В), А	10^{-7}
Емкость (при смещении —5 В), пФ	150
Фоточувствительная поверхность, см²	1
Обратное сопротивление при напряжениях смещения, близких к нулю, МОм	1—5
Эквивалентная мощность шума, Вт·Гц$^{-1/2}$	10^{-12}

При регистрации низкой постоянной освещенности приходится использовать большие $R_{вх}$. Сохранение линейности может быть обеспечено при наличии на ФП напряжения смещения. При этом необходимо всеми мерами уменьшать фоновый входной ток операционного усилителя, обусловленный, в частности, и темновым током ФП, так как в противном случае возникает заметное входное остаточное (темновое) напряжение. При этом следует использовать ФП с *p-i-n* структурой, обладающие малыми темновыми токами, в сочетании с операционными усилителями на полевых транзисторах. Возможность существенного уменьшения темнового выходного напряжения не устраняет, однако, проблему температурного дрейфа. Темновой ток ФП примерно удваивается при повышении температуры на каждые 10°С, поэтому во многих случаях используется фотовольтаический режим работы ФП, при котором темновой ток равен нулю. В табл. 3 приведены параметры ФП, используемых обычно в паре с операционным усилителем.

Используемые для регистрации слабых световых потоков фотоэлектронные умножители имеют более высокую чувствительность. Однако светочувствительный датчик, включающий совместно работающие ФП и операционный усилитель, имеет другие, не менее важ-

ные преимущества. Световая характеристика твердотельного датчика (зависимость выходного тока от освещенности) более линейна, чем аналогичная характеристика датчика с фотоумножителем. Нелинейность световой характеристики датчика с ФП не превышает 1% при изменении входной освещенности в пределах десяти декад. Твердотельный датчик обладает более стабильными параметрами и имеет повышенные световые допуски, не перегружается и не насыщается. Его спектральная характеристика отличается широким диапазоном (200—1100 нм). К другим преимуществам твердотельных датчиков следует отнести пониженную чувствительность к ударным и вибрационным нагрузкам, значительно меньшее напряжение питания (±15 В) операционного усилителя (по сравнению с 1000 В для ФЭУ), упрощение компановки, а также более высокую повторяемость геометрических размеров, необходимую для изготовления матричных датчиков высокой плотности.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРИМЕРЫ УСТРОЙСТВ С ФОТОПРИЕМНИКАМИ

ФЭП — источник питания реле. Сравнительно высокая мощность, генерируемая кремниевым ФЭП, позволяет непосредственно использовать их для питания реле, которое в этом случае характеризуется тремя основными параметрами: током срабатывания $I_{сраб}$, напряжением срабатывания $U_{сраб}$ и сопротивлением обмотки. Обеспечение максимальной эффективности работы системы реле — ФЭП в основном определяется выбором сопротивления обмотки реле. Оно должно быть таким, чтобы напряжение срабатывания реле не превышало 0,5 В. Оптимальным можно считать такое сопротивление обмотки ($R_{опт}$), при котором генерируемая ФЭП мощность будет максимальной. Напряжение срабатывания при этом будет равно 0,4 В.•

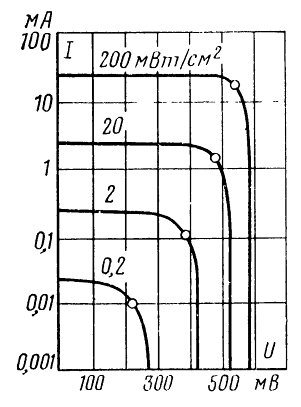


Рис. 35. Вольт-амперные характеристики ФЭП для различных величин энергетической освещенности. На кривых отмечены точки, соответствующие $R_{опт}$.

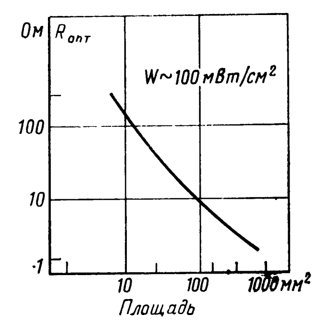


Рис. 36. Зависимость $R_{опт}$ от площади ФЭП.

Существенными параметрами ФЭП при работе с реле являются уровень облученности W, необходимый для срабатывания реле, и площадь ФЭП. Для ФЭП с определенной площадью значение $R_{опт}$

зависит от уровня облученности (рис. 35). Если фиксирована величина облучения, то $R_{опт}$ зависит от площади ФЭП (рис. 36).

Из промышленных реле для работы с ФЭП наиболее подходят поляризованные реле типа РП-5. На рис. 37 указана мощность, необходимая для срабатывания поляризованного реле РП-5 $R_{обм}=$

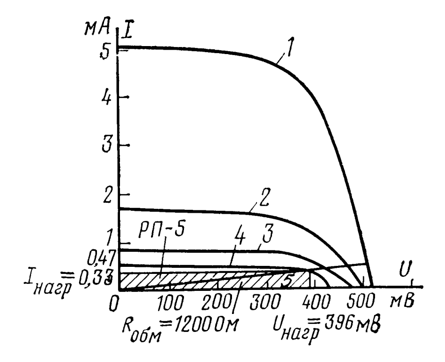


Рис. 37. Нагрузочные характеристики ФЭП с поляризованным реле РП-5.

1 — для ФЭП размером 5×5 мм² при $W=1000$ Вт/м²; *2* — для ФЭП размером 2×5 мм² при $W=1000$ Вт/м²; *3* — для ФЭП размером 2×5 мм² при $W=550$ Вт/м²; *4* — для ФЭП размером 5×5 мм² при $W=100$ Вт/м²; *5* — мощность срабатывания реле.

$=1200$ Ом. Из графиков видно, что работу реле могут обеспечить ФЭП со сравнительно небольшими светочувствительными площадками. Так, например, прибор площадью 5×5 мм² обеспечит работу реле при энергетической освещенности $W=10$ мВт/см², а ФЭП размером 2×5 мм² — при $W=55$ мВт/см². Работу реле РП-5 с параметрами $I_{сраб.макс}=0{,}22$ мА, $U_{сраб\ макс}=0{,}66$ В и $R_{обм}=3000$ Ом обеспечат два последовательно соединенных ФЭП и при тех же лучистых потоках.

При использовании реле, параметры которых трудно согласовать с параметрами ФЭП (при значительных $I_{сраб}$), необходимо введение каскадов усиления. Усилительные каскады могут быть выполнены на одном или нескольких транзисторах и работать в различных режимах. При работе ФЭП совместно со схемой полупроводникового реле на двух транзисторах с обратной связью по току или напряжению [43] порог срабатывания по величине воспринимаемого потока излучения может регулироваться в некоторых пределах подбором, например, сопротивлений резисторов, входящих в схему. Потребляя незначительную мощность, такие устройства способны переключать значительные токовые нагрузки. Они могут иметь небольшие размеры, обладать довольно высоким быстродействием, а также экономичностью и надежностью работы.

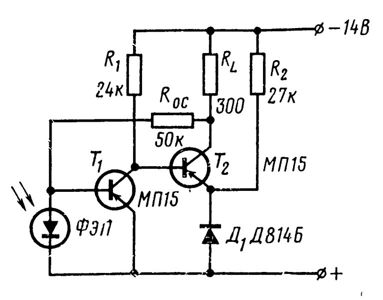


Рис. 38. Принципиальная схема усилительного каскада.

Принципиальная схема подобного устройства приведена на рис. 38. В качестве сопротивления нагрузки R_L здесь может быть использована, например, обмотка электромеханического реле.

ФЭП — источник питания медицинской аппаратуры. При разработке электронной медицинской аппаратуры все большую актуальность приобретает проблема защиты больного от потенциально опасных токов утечки датчиков. Одним из возможных путей изоляции больного от сети и других источников тока является телеметрия — передача данных от находящихся на теле датчиков к приемнику, встроенному в измерительную аппаратуру. Однако при этом возникает необходимость в частой проверке и смене батарей, так как появляется опасность их отказа в критический момент.

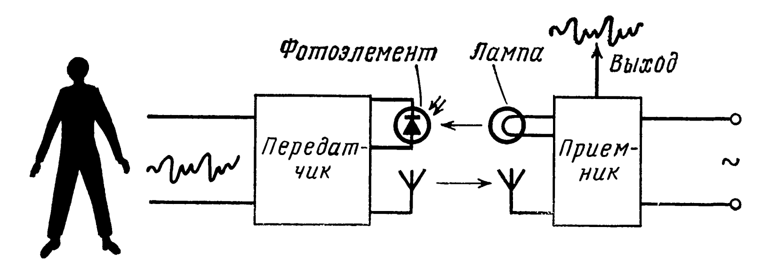


Рис. 39. Схема электропитания медицинской аппаратуры.

В аппаратуре, схема которой представлена на рис. 39, для питания передатчика использованы кремниевые ФЭП, освещаемые лампой накаливания. Лампа питается от сети переменного тока; свет от нее через световод попадает на батарею, состоящую из 12 ФЭП. Батарея напряжением 6 В при токе 2 мА питает передатчик и генератор низкой частоты, не вызывая опасности поражения током. Подобная схема может быть использована и в других измерительных системах, где требуется подобная изоляция.

ФД в устройствах с лазерными источниками излучения. Кремниевые ФД площадью 12,5 см² с успехом были использованы в качестве приемников в портативном лазерном переговорном устройстве.

Применение приборов с большой площадью позволило обойтись без специальных линз для сбора принимаемого излучения. Фотодиоды имели наилучшую спектральную чувствительность на длине волны $\lambda = 0{,}9$ мкм и могли принимать излучение в угле 100°.

Вход усилителя был отрегулирован так, чтобы отсечь фоновый шум кремниевого ФД. Таким образом, рабочий диапазон приемника определялся не пороговой чувствительностью ФД, а порогом логической схемы.

Кремниевый ФД использовался также в качестве детектора излучения лазера в лазерном дискретизирующем устройстве для воспроизведения чертежей.

ФП — детектор модулированного излучения. Возможность детектирования малоинерционными ФП модулированного когерентного излучения используется с целью повышения помехоустойчивости высокочувствительной лазерной интерферометрической аппаратуры при использовании ее в производственных условиях. В аппаратуре применен гетеродинный принцип. Вместо смещения двух лучей света одной частоты применен лазер, генерирующий на двух частотах. В установке осуществляется смешение световых лучей с двумя разными частотами. Возникающая в результате этого интерференцион-

ная картина, состоящая из чередующихся темных и светлых полос, трансформируется ФП в электрический сигнал.

Преимущество таких двухчастотных систем заключается в том, что информация передается с помощью сигналов переменного тока, что исключает влияние вариаций уровня постоянного сигнала помехи на входе.

Один ФП регистрирует интерференционную картину, возникающую в результате смешения отраженного от отражателя измерительного луча со второй частотой или частотой гетеродина. Второй ФП контролирует интерференционную картину до разделения путей, проходимых светом, и создает опорный сигнал, характеризующий картину полос при нулевом смешении. Сигнал от обоих ФП поступают в соответствующее устройство, выдающее информацию о величине и направлении смещений. При фотосмешении процесс фотодетектирования ФП эквивалентен детектированию света, прерываемого извне с частотой, равной разности двух генерируемых лазером частот. Квантовая эффективность и частотные характеристики ФП в связи с этим будут полностью обусловливаться факторами, изложенными в первом разделе. Предельная чувствительность фотосмесительного ФП, работающего при высоких частотах, может быть обеспечена, если он будет рассчитан на подавление теплового шума своего последовательного сопротивления.

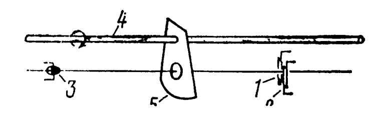


Рис. 40. Схема прецизионных весов с фотоприемником и светодиодом.

1, 2 — фотоприемники; *3* — светодиод, *4* — ось весов; *5* — подвижная диафрагма.

Измеритель скорости воздушного потока. В устройстве измерения скорости воздушных потоков последняя вычисляется по числу оборотов крыльчатки, которые фиксируются при помощи бесконтактного датчика импульсов. Датчик состоит из источника излучения, диска с прорезями и ФП. При вращении скрепленного с крыльчаткой диска с прорезями, прерывающего падающий на ФП луч света, в соответствии со скоростью вращения крыльчатки в секунду вырабатывается до 1000 прямоугольных импульсов напряжения с амплитудой, достигающей 4 В. Скорость воздушного потока подсчитывается по числу импульсов за фиксированный интервал времени.

Контрольные устройства. Весьма разнообразна возможность использования ФП в различного рода контрольных устройствах.

С помощью двух ФП (*1*, *2*) и СД (*3*) можно точно фиксировать разбаланс прецизионных весов (рис. 40). Вследствие разницы в массе содержимого чашей весов ось *4* поворачивается относительно точек опоры. Подвижная диафрагма *5* связана с осью и вращается одновременно с ней. При перемещении диафрагмы относительно равновесного положения изменяется режим облученности ФП, в результате чего появится разбаланс мостовой схемы, фиксируемый измерительным прибором. Изменяя расстояние плоскости диафрагмы относительно СД и ФП, можно варьировать разрешающей способностью весов. При приближении диафрагмы к ФП точность загрубляется и, наоборот, при расположении диафрагмы ближе к СД — повышается.

Высокая чувствительность ФЭП к небольшим изменениям интенсивности света используется для измерения толщины металлических пленок в процессе их вакуумного напыления [44]. При попадании

света от раскалившейся спирали распылителя на ФЭП в его выходной цепи появляется электрический ток. В процессе разогрева спирали фототок увеличивается в соответствии с возрастанием светового потока. После начала испарения металла, осаждающегося на поверхности ФЭП, фототок по мере увеличения слоя пленки падает пропорционально его толщине. Проведя калибровку толщины напыляемой пленки от величины фототока для каждого сочетания испаряемого материала, типа ФЭП, источника света и режима напыления можно точно управлять процессом. Фотопреобразователь без труда можно встраивать в установки для осаждения пленок либо размещать позади или рядом с подложкой, подключив выводы к соответствующему вакуумному вводу. Он также может работать в высоковакуумной аппаратуре и допускает прогрев системы до 400—500°С без заметного ухудшения параметров. Подобная система легко поддается автоматизации. Измерение выходного тока может быть осуществлено простейшим измерительным прибором.

На рис. 41 представлена схема фотосчетчика капель. Принцип его работы столь прост, что не нуждается в пояснении. На аналогичном принципе могут работать различные измерители и регуляторы уровня, а также манометры [12].

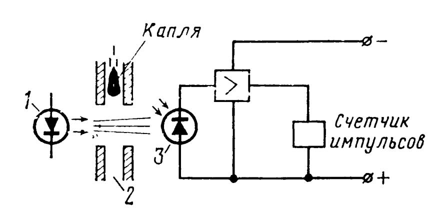


Рис. 41. Схема фотосчетчика капель.
1 — светодиод; *2* — канал для капель; *3* — фотоприемник.

В основе устройства для сортировки изделий лежит считыватель двоичного кода, в котором источником излучения служит СД из GaAs с максимумом излучения 0,950 мкм, а приемником — кремниевый ФП. Система предназначена для считывания черных и белых отметок цифрового кода на упакованных деталях, сходящих с конвейера. Светодиод на частоте 1,5 кГц генерирует импульсы длительностью 10 мкс и мощностью 150 мВт. До маркировочного знака через оптическую фокусирующую систему проходит примерно 1 мВт. На единицу поверхности маркировочного знака за время его прохождения мимо луча попадает примерно 20 импульсов. Если этот знак черный, то излучение поглощается, а если белый, то значительная часть излучения рассеивается обратно в широком угле и фиксируется установленным соответственным образом кремниевым ФП. Окружающий свет не мешает считыванию, так как для отсечки видимого излучения применен светофильтр. Система с ФП способна работать при окружающей засветке, суммарный уровень которой в 150 раз превышает уровень сигнала информации. Маркировочный знак имеет двухрядную конфигурацию. Белое над черным равно двоичной 1, а черное над белым соответствует двоичному 0. Импульсный режим работы СД обеспечивает достаточную мощность излучения и позволяет избавиться от окружающей ИК-помехи, вносящей постоянную составляющую. Система функционирует лучше, если кремниевые ФП работают на линейном участке их характеристик чувствительности.

Преимущество данной системы в отличие от систем, применяющих обычное электрическое освещение и считывание прямого отра-

женного излучения от специальной ленты, наклеенной на упаковку, заключается в смягчении требований к точности центровки упакованных деталей и допуску на расстояние между приемопередатчиком и корпусом.

Кремниевые ФП в видиконах. Еще один пример применения ФП — использование их в видиконах. В видиконе фирмы Техас Инструмент (рис. 42) использованы кремниевые ФП (запоминающие элементы) и электронно-лучевое сканирование. Отличие прибора от видикона обычной конструкции состоит в том, что вместо светочув-

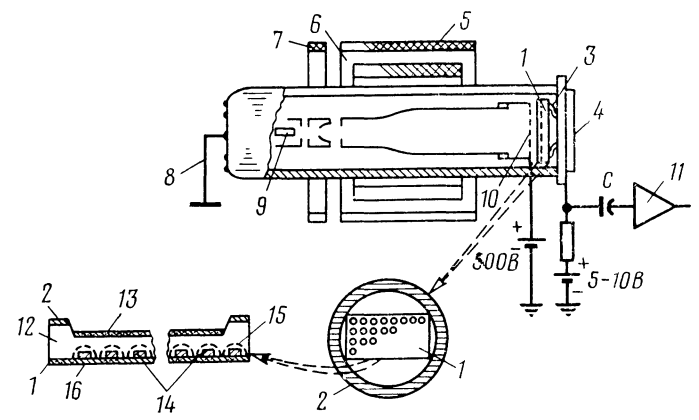


Рис. 42. Схема видикона с кремниевым ФП.

1 — фотодиодная матрица (мишень); *2* — золотой контакт; *3* — пружинные зажимы, *4* — стеклянная лицевая поверхность; *5* — фокусирующая катушка; *6* — горизонтально и вертикально отклоняющие пластины; *7* — опорное кольцо; *8*, *9* — катод; *10* — управляющая сетка; *11* — видеоусилитель; *12* — исходный кремний; *13* — просветляющее покрытие; *14* — локальные области с противоположной исходному кремнию типом проводимости; *15* — запорный слой; *16* — полупроводящее или диэлектрическое покрытие участков исходного кремния на стороне, обращенной к коммутирующему лучу.

ствительного материала, напыляемого на переднюю поверхность трубки, на нее механически укрепляют кремниевую ФП матрицу-мишень. Последняя представляет собой тонкий диск из монокристаллического кремния. Сторона, освещаемая светом, имеет просветляющее покрытие. По краю диска нанесен кольцевой контакт. На стороне, обращенной к электронному лучу, созданы участки с противоположной проводимостью, образующие матричную *p-n* фотоструктуру. Размеры отдельной ячейки таковы, что электронный луч одновременно перекрывает несколько элементов. Роль накопительной емкости играет запорный слой. Такие приборы по сравнению с обычными видиконами более устойчивы при высоких температурах к электронной бомбардировке, имеют меньшее запаздывание и размывание изображения, лишены усталостных явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рывкин С. М.** Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Физматгиз, М., 1963, 496 с.

2. **Вавилов В. С.** Солнечные батареи. — «Атомная энергия» 1956, вып. 3, с. 107.

3. **Тучкевич В. М., Челноков В. Е.** Кремниевые фотодиоды. — «Труды совещания фотоэлектрических и оптических явлений в полупроводниках». Киев, Изд во АН УССР, 1959.

4. **Фотоэлектрические** преобразователи солнечной энергии из *p*-кремния. — «Журнал технической физики», 1956, т. 26, вып. 10, стр. 2396. Авторы: Ю. П. Маслаковец, Г. Б. Дубровский, С. А. Полтинников, В. К. Субашиев.

5. **Наследов Д. Н., Царенков Б. В.** Спектральные характеристики GaAs фотоэлементов. — «Физика твердого тела», 1959, т. 1, № 9. с. 1467.

6. **Субашиев В. К., Соминский М. С.** Полупроводниковые фотоэлементы. — «Полупроводники в науке и технике». М., Изд-во АН СССР, 1959, с. 659.

7. **Васильев А. М., Ландсман А. П.** Полупроводниковые фотопреобразователи. М., «Советское радио», 1971, 248 с.

8. **Тришенков М. А., Фример А. И.** Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с *p-n* переходами. — «Полупроводниковые приборы и их применение». М., «Советское радио», 1971, вып. 25. с. 159.

9. **Туркулец В. И., Удалов Н. П.** Фотодиоды и фототриоды. М., Госэнергоиздат, 1962, 64 с

10. **Лидоренко Н. С.** Исследования по прямому преобразованию солнечной энергии в электрическую. — «Гелиотехника», 1967, № 5, с. 20—31.

11. **Якушенков Ю. Г.** Основы теории расчета оптико-электронных приборов. М., «Советское радио», 1971, 336 с.

12. **Литвак В. И.** Фотоэлектрические датчики в системах контроля, управления и регулирования. М., «Наука», 1966, 410 с.

13. **Мироненко А. Ф.** Фотоэлектрические измерительные системы. М., «Энергия», 1967, 360 с.

14. **Катыс Г. П.** Оптико-электронная обработка информации. М., «Машиностроение», 1973, 447 с.

15. **Адирович Э. И.** Оптоэлектроника. — В кн.: Микроэлектроника. М., «Советское радио», 1967, вып. 1, с. 75—128.

16. **Свечников С. В.** Элементы оптоэлектроники. М., «Советское радио», 1971, 272 с.

17. **Расчет** фотоэлектрических цепей. М., «Энергия», 1967, 200 с. Авторы: С. Ф. Корндорф, А. М. Дубиковский, Н. С. Муромова, Н. И. Перова, Е. Я. Сурова.

18. **Схема** автоматики с фоточувствительными и излучающими полупроводниковыми приборами. М., «Энергия», 1972. Авторы: В. Г. Воронин, А. К. Гребнев, А. И. Кривоносов, В. И. Русланов.

19. **Субашиев В. К., Ландсман А. П., Кухарский А. А.** Распределение атомов фосфора при диффузии в кремний. — «Физика твердого тела», 1960, т. 2, № 11, с. 2703—2709.

20. **Зайцева А. К., Глиберман А. Я.** Исследование рапределения примесей в поверхностном слое фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии из кремния *n*-типа. — «Физика твердого тела», 1961, т. 3, № 8, с. 2377—2382.

21. **Полупроводниковые** фотоэлементы повышенной эффективности с тянущим полем в легированной области. — «Физика и техника полупроводников», 1974, т. 8, № 1, с. 119. Авторы: И. П. Гаврилова, В. М. Евдокимов, М. М. Колтун, В. П. Матвеев, Е. С. Макарова.

22. **Бузанова Л. К., Глиберман А. Я.** Малоинерционные кремниевые фотоприемники. — «Доклады Всесоюзной конференции по использованию солнечной энергии», Ереван, 1969, секция С-1, с. 55—67.

23. **Исследование** высокоэффективных солнечных элементов из арсенида галлия и возможности их улучшения. — «Гелиотехника», 1967, № 2. Авторы: М. Б. Каган, А. П. Ландсман, Т. Л. Любашевская, Б. А Холев.

24. **Колтун М. М., Ландсман А. П.** Исследование отражения сильнолегированного арсенида галлия в широком спектральном интервале. — «Журнал прикладной спектроскопии», 1966, т. 5, № 6, с. 770—773.

25. **Высокочастотные кремниевые фотодиоды.** — «Обмен опытом в электронной промышленности», 1969, вып. 8, с. 5. Авторы: Л. К. Бузанова, А. Я. Глиберман, Л. Г. Титарев, А. А. Шленский.

26. **Бузанова Л. К., Глиберман А. Я., Грачева Н. М.** Влияние глубоких уровней, созданных термодиффузией примесей, на спектральные и емкостные характеристики кремниевых *p-n* переходов.— «Тезисы докладов Всесоюзного совещания по глубоким центрам в полупроводниках». Одесса, Изд-во АН УССР, 1972, с. 32.

27. **Глиберман А. Я., Федосеева О. П.** Влияние качества тыльного контакта на эксплуатационные характеристики кремниевых фотопреобразователей. — «Электротехника», 1965, № 12, с. 44.

28. **Глиберман А. Я., Зайцева А. К.** Кремниевые солнечные батареи. М., «Энергия», 1961, 72 с.

29. **Быстродействующие** фотодиоды для оптоэлектронных устройств.—«Электронная техника», серия VI, 1971, № 2, с. 9., Авторы: В. А. Автономов, И. В. Варламов, В. А. Колясников, Э. А. Полторацкий.

30. **Высокочастотные** кремниевые фотодиоды с *p-i-n* структурой перехода. — «Радиотехника и электроника», 1971, № 11, с. 2332. Авторы: Е. А., Георгиевская, А. Н. Истомин, Н. Н. Каменский, Ю. В. Причко, Я. А. Федотов.

31. **Ландсман А. П., Стребков Д. С., Унишков В. А.** Теоретическое и экспериментальное исследование матричных высоковольтных фотопреобразователей.—«Физика и техника полупроводников», т. 5, 11, 1971, с. 2136.

32. **Берман Л. С.** Варикапы. М., «Энергия», 1965, 40 с.

33. **Лисейкин В. П., Тришенков М. А.** Полупроводниковые приборы и их применение. М., «Советское радио», 1966, 22 с.

34. **Hans Eberhard Bergt.** BPY 12 und BPY 48 Silizium Planar Photodioden für Mess, Steuerung und Regelungstechnik. — «Simens Bauteile Informationen», 1970, 8, H. 1, S. 15—18.

35. **Спектры** фоточувствительности поверхностно-барьерного диода.—«Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, № 10, с. 1927—1932. Авторы: А. А. Гуткин, М. В. Дмитриев, Д. Н. Наследов, А. В. Пашковский.

36. **Глиберман А. Я., Молодык А. М., Комков В. В.** Кремниевые фотопреобразователи для считывания информации с перфолент и перфокарт в схемах программного управления. — «Приборы и системы управления», 1975, № 5

37. **Малышков Г. М., Русланов В. И.** Ключевые схемы с оптоэлектронными преобразователями. — «Электронная техника в автоматике», 1973, вып. 4, с. 119

38. **Аксенов Е. А.** Вводные устройства на перфоленте для систем прямого управления. — «Автоматизация операции проектирования процессов машиностроения». М., «Наука», 1970, с. 172.

39. **Фотоэлектрические преобразователи информации.** М., «Машиностроение» 1974 375 с. Авторы: Л. Н Преснухин, В Ф Шаньгин, С. А. Майоров, И. В. Меськин.

40. **Джун-Ити Нисидзава.** Создание оптоэлектронных приборов для цифровой техники. — «Электроника», 1967, № 25, с 28.

41. **Полякова И. Ф., Удалов Н. П.** Возможности построения оптрона с управляемым оптическим каналом — «Оптическая и электрооптическая обработка информации». М., «Наука», 1974, с. 71.

42. **Высокочувствительный экспонометр.** — «Электроника», 1972, т. 45, № 3, с. 4.

43. **Малышков Г. М., Русланов В. И.** Фотореле. — «Электронная техника в автоматике», 1972, вып. 3, с. 168.

44. **Хадсон, Рейнольдс.** Применение солнечного элемента для измерения толщины тонких пленок в процессе осаждения. — «Приборы для научных исследований», 1971, № 7, с. 164.

45. **Вендлэнд.** Светочувствительный датчик в виде пары кремниевый фотодиод — операционный усилитель — «Электроника», 1971, т. 44, № 11, с. 30

ОГЛАВЛЕНИЕ

Людмила Константиновна Бузанова
Анатолий Яковлевич Глиберман

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ

Редактор В. И. Русланов
Редактор издательства Г. Н. Астафуров
Обложка художника А. А. Иванова
Технический редактор Н. Н. Левченко
Корректор А. Д. Халанская

Сдано в набор 21/VII 1975 г. Подписано к печати 25/XII 1975 г. Т-21339
Формат $84 \times 108^1/_{32}$ Бумага машиномелованная
Усл. печ. л. 3,36 Уч.-изд. л. 4,68
Тираж 40 000 экз. Зак. 263 Цена 21 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Цена 21 коп.